

GÁSSIO ANTONIO TORMENA

**Resistência à Penetração e Porosidade em
Plantio Direto Influenciados por Preparos
Pré-implantação, Calagem e Tráfego**

**Dissertação apresentada ao Curso de Pós
Graduação em Agronomia, Área de concen-
tração "Ciência do Solo", Setor de Ciên-
cias Agrárias, Universidade Federal do
Paraná, como requisito parcial à obtenção
do grau de Mestre em Agronomia.**

Curitiba

1991

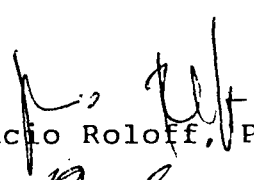


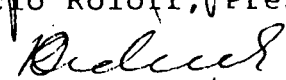
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA-ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
"CIÊNCIA DO SOLO"


P A R E C E R

Os Membros da Comissão Examinadora, designados "ad-referendum" pela Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Agronomia - Área de Concentração "Ciência do Solo" para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato CÁSSIO ANTONIO TORMENA, com o título: "RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E POROSIDADE EM PLANTIO DIRETO INFLUENCIADOS POR PREPAROS PRÉ-IMPLANTAÇÃO E TRÁFEGO", para obtenção do grau de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo" do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de Parecer pela "APROVAÇÃO" da Dissertação, com o conceito "A", completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo".

Secretaria do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", em Curitiba, 26 de novembro de 1991.


Prof. Dr. Glaucio Roloff, Presidente.


Engº Agrº Dr. Renato Antonio Dedeczek, 1º Examinador.


Prof. Dr. Celso Luiz Prevedello, 2º Examinador.


Profª Beatriz Monte Serrat Prevedello, Coordenadora em exercício.

À Denise e ao Henrique, dedico

Agradecimentos

A realização deste trabalho teve a participação e a contribuição de inúmeras pessoas. Em especial gostaria de expressar meus agradecimentos às seguintes pessoas e entidades:

Ao Prof. Glaucio Roloff, pela orientação segura e competente, e pela sua amizade;

Aos Professores, William, José Marcos e Roberto (UEM) pela amizade e estímulo, e ao Prof. José de Deus Viana da Mata pelas sugestões apresentadas;

Aos Professores do Curso de Pós-Graduação, e em especial ao Prof. Celso Luís Prevedello, pela sua dedicação e conhecimentos transmitidos;

Aos meus pais, Isidoro e Maria, por seu amor e preocupação, e aos meus irmãos, Carlos, Clóvis e Célia pelo apoio e estímulo;

À Paulina e ao Manoel, pela amizade e apoio nas horas mais difíceis, e ao Romeu Hepp, pela sua sincera amizade;

À Célia e ao Fernando, meus cunhados, pelo apoio e solicitude;

À Fundação Universidade Estadual de Maringá, por ter proporcionado esta oportunidade, e à Agnes Munhóz Rubira (NPD) pelo apoio no processamento dos dados;

Aos companheiros de curso de pós-graduação, e em especial ao Jucinei e Lutécia pelo auxílio na coleta dos dados;

À Fundação ABC, pelo apoio financeiro, instalação e condução do experimento;

Ao Agrônomos João Carlos de Moraes Sá (Fundação ABC) e Nelson Freire (Coop. Batavo) pelo apoio na realização deste trabalho;

Aos funcionários do Departamento de Solos da UFPR, e aos funcionários do laboratório de Física do Solo;

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos;

E a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
INTRODUÇÃO	1
OBJETIVOS	3
1.RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO	5
1.REVISÃO DA LITERATURA	5
1.1.Importância da Impedância mecânica	5
1.2.Mecânica dos processos de Penetração	9
1.3.Variabilidade da Resistência à Penetração	12
1.4.Relações da Resistência à Penetração do Solo com Outras Propriedades Físicas do Solo	16
1.5.Relações da Resistência à Penetração do Solo com o Sistema Radicular	19
1.6.Relações da Resistência à Penetração do Solo com Sistemas de Preparo do Solo	24
2.MATERIAIS E MÉTODOS	28
2.1.Localização do Experimento e Caracterização do Solo	28
2.2.Tratamentos Utilizados	29
2.3.Sistema de Cultivo e Manejo das Culturas	30
2.4.Determinação da Resistência à Penetração	31
2.5.Desenho Experimental e Análise Estatística	34
3.RESULTADOS	36
3.1.Calibração do Penetrômetro	36
3.2.Estado Anterior	39
3.3.Efeito dos Tratamentos por Profundidade	40
4.DISSCUSSÃO	54

5.CONCLUSÕES	58
11.POROSIDADE DO SOLO	
1.REVISÃO DA LITARATURA	58
1.1.Determinação, Classificação e Função dos Poros no Solo	58
1.2.Fatores do Manejo e Propriedades Físicas do Solo	63
1.3.Importância Agronômica dos Poros	72
2.MATERIAIS E MÉTODOS	76
2.1.Coleta de Amostras Indeformadas	76
2.2.Curva de Retenção de Água no Solo	78
2.3.Densidade do Solo e de Partículas	78
2.4.Porosidade do Solo	78
2.5.Conteúdo de Água Disponível	79
3.RESULTADOS	80
3.1.Estado Anterior	80
3.2.Resultados Pós-implantação	82
3.2.1.Densidade do solo	82
3.2.2.Porosidade do Solo	86
3.2.3.Conteúdo de Água Prontamente Disponível	97
4.DISSCUSSÃO	106
5.CONCLUSÕES	109
SUMMARY	111
ANEXOS	112
LITERATURA CITADA	122

RESUMO

Resistência à Penetração e Porosidade em
Plantio Direto Influenciados por Preparos
Pré-implantação, Calagem e Tráfego.

A compactação do solo em superfície e a colocação superficial de fertilizantes e corretivos podem limitar a produtividade sob plantio direto, e exigir um eventual revolvimento do solo. Comparou-se três métodos de preparo de solo e dois níveis de calagem na implantação do plantio direto, em Latossolo Vermelho Escuro, conduzido sob tráfego controlado. Foi avaliada a resistência à penetração e a porosidade do solo, nos dois primeiros anos após a implantação do plantio direto. O tráfego em superfície promoveu aumentos na resistência à penetração, na densidade do solo, e a redução no volume de poros totais e porosidade de aeração. Também o conteúdo de água entre os potenciais de -6 e -100 kPa foi reduzido sob tráfego. A resistência à penetração demonstrou ser um bom parâmetro para avaliar os efeitos do tráfego e do adensamento do solo por mecanismos naturais, refletindo a variabilidade temporal na estrutura do solo. Os valores de resistência à penetração, expressos como índice de cone, demonstraram não serem impeditivos ao crescimento radicular, num conteúdo de água padronizado de 0,34 g/g. A presença de camadas compactadas em subsuperfície parece ter influenciado a distribuição da compactação em profundidade, devido ao efeito do confinamento do perfil. Os efeitos do preparo, em superfície, foram eliminados pelo tráfego, o qual demonstrou ser o fator mais importante de alteração da estrutura do solo.

INTRODUÇÃO

O sistema de plantio direto é uma técnica apropriada para garantir a conservação do solo e água nas nossas condições climáticas. Também a redução nos custos operacionais é outra vantagem na adoção do sistema (LARSON e OSBORNE, 1982). Apesar do conjunto de vantagens proporcionadas, existem alguns impedimentos observados no decorrer do tempo que podem limitar o potencial produtivo dos solos sob plantio direto, e conseqüentemente restringir sua adoção em maior escala.

No sistema de plantio direto, o revolvimento do solo é restrito a linha da semeadura, mas o tráfego ocorre normalmente. Assim pode-se esperar um aumento na compactação do solo, principalmente em superfície. O potencial produtivo do solo pode ser reduzido pela excessiva impedância mecânica e má aeração do solo (BAUDER et al., 1981; CASSEL, 1982; VOORHEES, 1983; HARGROVE e HARDCASTLE, 1984), e reduzida disponibilidade de água as culturas. Isto pode explicar as situações em que baixas produtividades estão relacionadas com sistemas de mínima mobilização do solo.

A estrutura do solo resultante do seu manejo pode ser avaliada de diferentes formas. A resistência à penetração, expressa como Índice de Cone (IC), tem sido utilizada para quantificar a qualidade estrutural do solo, de forma mais intensiva em outros países. Também a porosidade do solo e suas relações com a aeração e armazenamento de água

possibilitam quantificar os efeitos dos fatores de manejo aplicados ao solo.

A correção das limitações de ordem física e química antes da implantação do plantio direto é um pré-requisito fundamental. No entanto, há poucos resultados quantitativos do comportamento das propriedades físicas do solo em função da intensidade de mobilização do solo e calagem, como preparativos para implantação do plantio direto. Os efeitos do tráfego, após sua implantação, não têm sido pesquisados de forma sistemática, mas a literatura demonstra que grande parte da compactação neste sistema ocorre logo após as primeiras entradas de máquinas na área (VOORHEES, 1978; BLACKWELL et al., 1989; MEEK et al., 1988). Assim o preparo do solo, calagem e o tráfego promovem alterações na estrutura do solo, com consequências sobre o ambiente radicular. O conhecimento dos mecanismos e processos envolvidos nestas alterações possibilita manipular o ambiente radicular de forma a usar eficientemente os recursos naturais e tecnológicos, maximizando a produção agrícola e reduzindo a degradação ambiental.

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento da estrutura do solo, através de medidas da resistência à penetração e porosidade do solo, nos dois primeiros anos de implantação do sistema de plantio direto. Este foi implantado utilizando diferentes métodos de preparo do solo, diferenciados basicamente pela profundidade de revolvimento, calagem e tráfego de máquinas na sua condução. O trabalho

aqui apresentado será dividido em dois capítulos, I)resistência à penetração e, II)porosidade do solo, visando um maior detalhamento e compreensão dos parâmetros estudados.

OBJETIVOS

OBJETIVOS GERAIS:

O presente trabalho é parte de um estudo à longo prazo de um sistema de plantio direto implantado sobre três diferentes sistemas de preparo do solo, diferenciados basicamente pela profundidade de revolvimento: dois níveis de calagem e dois níveis de tráfego. O objetivo é quantificar o comportamento da resistência à penetração e porosidade do solo em função dos métodos de preparo, calagem, do tráfego e do tempo. As avaliações foram feitas sob condições de tráfego controlado, o qual possibilita compreender melhor os mecanismos envolvidos na compactação do solo pelo tráfego, bem como sua interação com os métodos de preparo e calagem.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1.Resistência à Penetração.

1.1.Determinar a variação temporal e espacial da resistência à penetração, bem como o adensamento do solo e os possíveis mecanismos envolvidos;

1.2.Identificar a magnitude de atuação dos métodos de preparo do solo (arado de discos, alvecas e rotativo); calagem (com e sem calcário) e do tráfego(com e sem), sobre a resistência à penetração;

1.3. Identificar o grau de impedimento ao crescimento radicular, devido ao tráfego, tomando como base índices de resistência à penetração fornecidos pela literatura;

1.4. Validar um método de calibração do penetrômetro que possibilite individualizar os efeitos dos tratamentos;

1.5. Verificar a existência de uma provável reversão da resistência à penetração com o tempo.

II. Porosidade do Solo.

II.1. Determinar a importância relativa dos métodos de preparo, e dos níveis de calagem e tráfego sobre a porosidade do solo, densidade do solo e água disponível;

II.2. Quantificar as possíveis alterações nos parâmetros estudados, devido a compactação pelo tráfego;

II.3. Identificar a provável ocorrência de reversão nas propriedades físicas estudadas com o tempo.

1.RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO.

1.REVISÃO DA LITERATURA.

A impedância mecânica é um fator importante para o crescimento radicular, estando relacionada com a elongação e proliferação de raízes no solo. Entre as diversas metodologias para avaliar a impedância mecânica, a mais prática, econômica e versátil, e também mais discutida e criticada, é a utilização de penetrômetros de cone (BRADFORD, 1986; GILL, 1968).

A penetrometria é o método mais conveniente para quantificar a resistência do solo, embora superestime a resistência para o crescimento radicular (PERUMPRAL, 1987). No entanto, não há uma rotina metodológica básica o suficiente para fazer estimativas mais precisas da impedância mecânica do solo. Apesar de suas limitações e das dificuldades na interpretação dos resultados obtidos, o penetrômetro é um instrumento de grande utilidade na avaliação de sistemas de preparo do solo.

1.1.Importância da Impedância Mecânica.

A avaliação da resistência mecânica do solo tem sido feita por diferentes metodologias. BENGHOUGH e MULLINS (1990a) analisaram as vantagens e desvantagens dos vários procedimentos experimentais e concluíram que a penetrometria ainda é o método mais conveniente para estimar a resistência ao crescimento radicular, apesar de suas limitações. Os penetrômetros de cone têm sido amplamente utilizados para avaliar a resistência do solo, apesar das diferenças óbvias

existentes entre a raiz e um cone metálico (BARLEY e GREACEN, 1967).

A escolha do tipo de penetrômetro a ser utilizado e a interpretação cuidadosa dos dados obtidos são elementos essenciais para melhorar a precisão das estimativas de resistência do solo à penetração. O espaço poroso no qual as raízes podem crescer, não possui geometria reta, e a raiz pode exercer uma força sobre a matriz do solo com objetivo de rearranjar o espaço poroso. Por isso, alguns pesquisadores têm sugerido o uso de penetrômetros com diâmetros da extremidade o mais próximo possível daqueles das raízes. Por exemplo, GROENEVELT et al.(1984) utilizaram uma combinação da geometria dos poros do solo e da resistência à penetração, obtida com um micropenetrômetro, para explicar a interação entre as condições do solo e o crescimento radicular.

A resistência à penetração é expressa através da relação entre a força exercida para fazer penetrar um cone metálico no solo e sua área basal, comumente expressa como Índice de cone (IC) (BRADFORD, 1986). A validade do IC na avaliação da impedância mecânica tem recebido diferentes considerações entre os pesquisadores (CASSEL, 1982). Alguns consideram que o IC não é apropriado para a pesquisa em campo, em função dos penetrômetros possuírem diâmetros maiores do que as raízes, penetrarem no solo mais rapidamente que as raízes e serem incapazes de desviar

partículas e agregados adensados do solo. Outros pesquisadores fixam-se na física complexa da penetração dos cones no solo, devido as forças de fricção e compressão associadas com a penetrometria. Há ainda um terceiro grupo de pesquisadores que faz uso do penetrômetro para estudar, comparativamente, a impedância mecânica apesar das dificuldades na interpretação dos dados.

A compactação do solo pode alterar o padrão de crescimento das raízes pelo aumento na resistência do solo, decréscimo na porosidade, em prejuízo da aeração, ou ainda por diminuir a quantidade de água disponível. Desta forma, é muito difícil medir e estimar com precisão se a resistência encontrada pelas raízes é responsável pelo prejuízo ao sistema radicular. A mensuração da resistência real encontrada pelas raízes, idealmente deveria ser feita através de medidas diretas (STOLZY and BARLEY, 1968). No entanto, as dificuldades práticas têm levado os pesquisadores a adotar as medidas obtidas por penetrômetros como estimativas da resistência encontrada pelas raízes (GREACEN e OH, 1972).

A elongação das raízes varia inversamente com a resistência à penetração. Como os penetrômetros avaliam uma resistência cerca de duas a oito vezes maior que a encontrada pela raízes (MISRA et al., 1986), e a resistência medida sempre excede a pressão máxima que as raízes podem

efetivamente exercer. Estudos em sistemas artificiais mostram que a elongação das raízes foi interrompida quando as pressões aplicadas ainda eram menores que 0.01 MPa (GOSS, 1977; BARLEY, 1963). EAVIS (1967, citado por BENGHOUGH e MULLINS, 1990a) demonstrou a ocorrência de uma redução em 70% na taxa de elongação das raízes quando a resistência ao crescimento radicular medida diretamente foi de aproximadamente 0.34 MPa. No entanto, uma resistência ao penetrômetro entre 0.8 e 5.0 MPa foram considerados limitantes para o crescimento de raízes no solo por DEXTER (1986). Estes resultados mostram as dificuldades de relacionar as diferentes resistências à penetração medidas por penetrômetros com o potencial radicular de cada cultura.

A Impêdância mecânica tem demonstrado maior precisão que a densidade do solo na comparação de diferentes tratamentos de preparo do solo e tráfego (CASSEL et al., 1978; PEARSON, 1981) e tem sido considerada como um indicador mais sensível dos efeitos do preparo e tráfego do que a densidade do solo (GULLEY et al., 1987; BAUDER et al., 1981). A densidade do solo varia desde < 1,0 g/cm³ até > 1.70 g/cm³, com pequena amplitude de variação (CASSEL e BAVER, 1975), enquanto que o IC varia desde 0 até 9.0 MPa, indicando que a resistência medida com o penetrômetro apresenta maior sensibilidade aos efeitos do preparo e tráfego (CASSEL, 1982). A densidade do solo é mais sensível ao volume total de poros e, relativamente não sensível aos planos de fraqueza que podem ser criados por ciclos de

secagem e umedecimento, alterando o grau de compactação do solo (VOORHEES, 1983). Enquanto BAUDER et al. (1981) salientam que a resistência à penetração e a densidade do solo são parâmetros importantes nas avaliações de sistemas de preparo, TAYLOR e GARDNER (1963) e TAYLOR e BURNETT (1964) afirmam ainda que a resistência do solo medida através de penetrômetro é melhor associada ao ambiente radicular que a densidade do solo, de modo que aquela pode ser considerada como uma das principais medidas na avaliação de sistemas de preparo, já que controla a penetração de raízes no solo.

1.2. Mecânica dos Processos de Penetração.

As raízes são órgãos flexíveis que seguem os caminhos de menor resistência no solo, explorando os planos de fraqueza entre as unidades estruturais do solo (BENGHOUGH e MULLINS, 1990a). Elas também excretam mucilagens ao redor de suas extremidades e expandem o poro quando fisicamente impedidas. Quando a raiz encontra resistência mecânica ao seu crescimento, a força de crescimento radicular aumenta devido a elevação da pressão osmótica nas células de crescimento das raízes (TAYLOR e RATLIFF, 1969a). Por outro lado, durante a penetração de um cone metálico, o solo é submetido a um esforço plástico próximo ao cone e, mais externamente, a um processo de compressão elástica

(FARREL e GREACEN, 1966). Na penetração de um cone no solo, dois componentes contribuem para a resistência da ponta do cone: a resistência à compressão, e a resistência friccional ao longo das paredes do cone (TOLLNER e VERMA, 1984), sendo que esta última pode ser responsável pela maior parte da resistência total (GROENEVELT et al., 1984). A resistência friccional deveria ser subtraída da resistência total para melhorar as estimativas da resistência obtida com penetrômetros convencionais, pois as raízes não encontram resistência friccional, devido a ação lubrificante resultante da excreção de mucilagens das células da coifa (BARLEY, 1976).

Os penetrômetros variam de aproximadamente 0.15 mm de diâmetro como aquele utilizado por GROENEVELT et al. (1984) até aqueles com diâmetro de 20.27 cm, padrão da ASAE (ASAE, 1969, citado por BENGHOUGH e MULLINS, 1990a). As resistências total e friccional dos diferentes penetrômetros são, portanto, bastante variáveis.

O grau de estruturação do solo tem influência nos resultados obtidos com penetrômetros, em função das relações entre o tamanho das unidades estruturais e a ponta dos cones (BRADFORD, 1986). Os penetrômetros avaliam a resistência média numa zona próxima à ponta do cone, e assim são incapazes de detectar mudanças na resistência do solo, que estão numa escala menor que as dimensões da sua ponta (BENGHOUGH e MULLINS, 1990a). As medidas de resistência à penetração, relacionadas com o crescimento radicular,

deveriam ser feitas numa escala próxima ao diâmetro das raízes (TAYLOR, 1974). GROENEVELT et al.(1984) avaliaram as variações em pequena escala na resistência do solo utilizando um penetrômetro com diâmetro de 0.15 mm para determinar a proporção da profundidade linear penetrada que possuía resistência menor do que 1.0 MPa, considerada por eles a resistência limite para o crescimento radicular.

Existe ampla evidência experimental da influência do diâmetro de cones e raízes sobre a resistência à penetração (DEXTER e TANNER, 1973; BARLEY et al., 1965; BRADFORD, 1980; WHITELEY et al., 1981). As raízes finas podem deformar elasticamente o solo, e consequentemente penetram mais facilmente do que as raízes grossas, as quais causam deformação plástica no solo (RICHARDS e GREACEN, 1986). Contudo, não há indicações de que raízes finas são necessariamente menos impedidas (GOSS, 1977). As raízes podem crescer ao redor de agregados adensados, ao passo que os penetrômetros penetram estes agregados, superestimando a resistência do solo às raízes. TAYLOR and GARDNER (1963) sugerem que a causa da penetração das raízes no solo é resultante de um balanço de forças entre a zona de divisão celular das raízes e o solo próximo, diferindo do mecanismo de penetração dos cones metálicos no solo.

BRADFORD (1980) utilizou dois diâmetros de cone para estimar a magnitude da variabilidade na resistência à penetração e seus resultados indicaram que quanto menor o tamanho do cone, maior a variabilidade obtida. Estes

resultados justificam-se pelo fato do cone de menor diâmetro ser mais sensível aos planos de fraqueza entre as unidades estruturais do solo comparado ao cone de maior diâmetro, o qual cisalha um grande volume de solo, não detectando pequenas fendas e poros no solo.

A velocidade de penetração de cones tem sido amplamente discutida com relação ao seu efeito sobre a resistência à penetração e, não há consenso entre os autores sobre sua influência nos resultados. Em solos com elevado conteúdo de água, a resistência à penetração é mais diretamente relacionada com a velocidade de penetração devido as interações da parede do cone com a água (COCKROFT et al., 1969). Velocidades de penetração entre 0.1 e 13.1 cm/h não afetaram significativamente a resistência obtida com penetrômetro (BRADFORD et al., 1971).

O IC é um parâmetro útil nas avaliações dos efeitos de preparo e tráfego sobre a resistência do solo ao crescimento radicular. Isto porque existe ampla evidência da boa correlação entre a resistência medida com penetrômetro e as taxas de crescimento radicular.

1.3. Variabilidade da Resistência à Penetração.

Os solos que possuem um determinado nível de desenvolvimento estrutural apresentam um grau elevado de variabilidade espacial e temporal das suas propriedades físicas, inclusive aquelas importantes para o crescimento radicular. Os sistemas de preparo, e em menor escala o tipo de solo, podem induzir diferentes magnitudes de

variabilidade na resistência à penetração (SELIM et al., 1987).

A ausência de um controle sistemático do tráfego sobre as áreas experimentais causa variabilidade significativa do IC em função da profundidade e posição de amostragem (BAUDER et al., 1981; VASQUEZ et al., 1989; CASSEL, 1983), além das diferenças entre tratamentos de preparo. Porém, mesmo em condições de laboratório ocorre variabilidade da impedância mecânica (STITT et al., 1982).

A posição (linha e entre-linha das culturas) de amostragem é uma fonte altamente significativa na variação do IC (CASSEL et al., 1978), provavelmente devido a ação das raízes no processo de agregação e dessecação do solo. ONOFIUK (1988) também demonstrou a importância dos efeitos da posição e época de amostragem em estudos de variabilidade da resistência à penetração. A variabilidade temporal da resistência à penetração teve uma relação direta com a flutuação no conteúdo de água em função das condições climáticas atuantes. Com relação a densidade do solo, ONOFIUK (1988) não obteve variações estatisticamente significativas da densidade do solo e resistência à penetração com o tempo, ao contrário dos resultados obtidos por CASSEL (1983). PIDGEON e SOANE (1977), observaram acréscimos nos valores de resistência à penetração em solos sob plantio direto na Escócia. A densidade do solo

estabilizou-se após três anos, enquanto a resistência à penetração continuou aumentando.

A variabilidade dos resultados de resistência à penetração tem causado dificuldades na interpretação dos dados. Esta alta variabilidade é apontada como uma desvantagem do uso de penetrômetro (GLASBEY e OSSULIVAM, 1988). Assim, apesar das medidas de IC serem mais facilmente realizadas do que a densidade do solo, é mais difícil interpretá-las (BRADFORD, 1986). O conceito de penetrabilidade linear percentual foi utilizado por GROENEVELT et al. (1984) para reduzir os problemas que a variabilidade vertical causa na interpretação dos dados. Com o mesmo objetivo, CASSEL et al. (1978) e CASSEL (1982), além de amostragens intensivas, consideraram os efeitos de posição na entre-linha, com e sem tráfego e, linha da cultura, facilitando a interpretação dos dados. Os seus resultados indicam uma redução no erro padrão da média dos resultados de IC nas posições onde o solo sofreu alterações mais drásticas, significando uma redução na variabilidade dos resultados obtidos. CASSEL e NELSON (1979a) concluíram que, apesar da grande variabilidade nos dados, estes podem ser adequadamente interpretados quando selecionados e transformados, e assim utilizados para avaliar os efeitos do manejo do solo na resistência à penetração.

A quantificação da variabilidade associada com o IC medido no campo requer atenção especial quanto aos detalhes da amostragem, com objetivo de fornecer um número suficiente

de repetições para validar a análise estatística. As dificuldades operacionais e de tempo, associadas com penetrômetros operados manualmente, podem exigir a utilização de parâmetros estatísticos menos precisos, em função do menor número de repetições e da menor intensidade de amostragens, tornando maiores os coeficientes de variação. CASSEL et al.(1978) mostraram que os coeficientes de variação para 168 tratamentos resultantes de combinações de preparo, profundidade e posição de amostragem variaram de 5 a 111%, com a maioria dos CVs na faixa de 40 a 70%, os quais são considerados elevados em outras áreas da ciência do solo.

A variação temporal nas características físicas do solo adquire especial importância em sistemas de pouca mobilização do solo, onde a estabilização destas deve ocorrer em condições que permitam um bom desenvolvimento do sistema radicular das culturas. A reversão nas propriedades físicas depende mais da manipulação do solo do que da sequência de culturas (CARY e HAYDEN, 1974).

Os aspectos inerentes a variabilidade temporal e espacial da resistência à penetração estão relacionados com os processos de adensamento do solo após o preparo, compactação pelo tráfego de máquinas, e principalmente pelas variações do conteúdo de água do solo com o tempo, o qual acompanha a dinâmica do clima em áreas não irrigadas.

1.4. Relações da Resistência à Penetração com Outras Propriedades Físicas do Solo.

A resistência à penetração (ou IC) tem relação direta com a densidade do solo, e inversa com o conteúdo de água (EAVIS, 1972; CAMPBELL, 1974; NESMITH et al., 1987; BLACKWELL et al., 1986; VEPRASKAS et., 1986). A dependência das medidas de IC em relação ao conteúdo de água aumenta proporcionalmente com a elevação nos valores de densidade do solo (VOORHEES, 1983). Isto porque, com o aumento da densidade, há um aumento proporcional na resistência ao cisalhamento do solo, devido a maior fricção entre as partículas. Assim, quando o conteúdo de água diminui, a coesão aumenta e o efeito lubrificante da água diminui (CASSEL et al., 1978).

A densidade do solo e o conteúdo de água exercem um efeito marcante sobre a resistência ao cisalhamento tanto em solos deformados quanto em agregados naturais (ALL-DURRAH e BRADFORD, 1981). Outros fatores também afetam o IC, tais como, textura, conteúdo de matéria orgânica (BRADFORD, 1986) e a rugosidade superficial das partículas (CRUSE et al., 1980). A dependência do IC em relação a umidade dificulta a operacionalização das amostragens e, idealmente, as amostragens devem ser feitas com umidade próxima à capacidade de campo (CASSEL, 1982).

Para uma interpretação adequada dos dados de IC, há

necessidade que, simultaneamente à penetrometria, sejam determinados os valores de densidade do solo e umidade. VEPRASKAS (1984) demonstrou que além destas propriedades, a resistência à penetração é bem correlacionada com a distribuição de tamanho de poros. BYRD e CASSEL (1980) obtiveram uma correlação negativa do IC com o volume de poros com diâmetro maior que 0.16 mm, cuja água retida é facilmente drenada a baixas tensões.

Vários autores tem avaliado a impedância mecânica associada a diferentes sistemas de preparo do solo (CASSEL, 1983; BAUDER et al., 1981; GULLEY et al. 1987), procurando identificar o comportamento do solo nas condições estudadas, com especial interesse na resistência à penetração, além de outras propriedades físicas do solo.

O preparo do solo, de acordo com a intensidade e profundidade de mobilização, resulta em condição final do solo diferenciada (SHAFFER e JOHNSON, 1982), alterando a magnitude da impedância mecânica do solo devido a intensidade e qualidade das forças exercidas, vertical e horizontalmente, no solo (CASSEL, 1982). GOODERHAM (1976, citado por CASSEL, 1983), indica que o preparo profundo do solo alterou sua densidade em todo o perfil mobilizado, com conseqüente redução no IC em todo o perfil, enquanto que sistemas de preparo que mobilizam o solo até 20-25 cm mantêm, nestas profundidades, elevados valores de densidade e conseqüentemente do IC. STITT et al. (1982),

utilizaram vários modelos para correlacionar o IC com até três variáveis independentes. Nos modelos com uma única variável, o conteúdo volumétrico de água foi a variável mais importante. Em todos os modelos, o coeficiente de regressão para o conteúdo de água foi negativo, indicando que o IC é inversamente proporcional ao conteúdo de água. O modelo que melhor correlacionou o IC com propriedades do solo incluía umidade volumétrica, densidade do solo e um índice relativo à rugosidade superficial das partículas do solo (CRUSE et al. 1980) com $R^2=0.67$. O ângulo de repouso denso também tem relação com o IC devido a forma dos grãos de areia contribuir para a formação de camadas compactadas no solo (STITT et al., 1982; CRUSE, 1980), apesar de exercer apenas um pequeno impacto sobre a impedância mecânica (VEPRASKAS E CASSEL, 1986). VOORHEES (1983) obteve correlações específicas do IC e umidade do solo para classes distintas de densidade do solo, obtendo assim melhores correlações entre as variáveis. Sob condições de campo, com uma variabilidade natural muito grande (CASSEL e NELSON, 1979a), nem sempre é possível obter boas correlações entre IC, umidade e densidade do solo.

Vários autores têm relatado que o IC tende a ser log-normalmente distribuídos (CASSEL e NELSON, 1979b; MCINTYRE e TANNER, 1959). Já STITT et al. (1982) relata que a transformação logaritmica dos dados melhorou bem pouco o coeficiente de correlação entre o IC e outras propriedades do solo.

Pelo exposto, conclui-se que a calibração do IC em relação a densidade e umidade é necessária para tornar possível a comparação dos valores de IC, restringindo os efeitos intervenientes, e separando os efeitos dos tratamentos. Isto apesar das dúvidas existentes quanto a melhor maneira de proceder esta calibração

1.5. Relações da Resistência à Penetração com o Sistema

Radicular.

O crescimento de uma raiz, em comprimento, ocorre quando as células da região meristemática se dividem, alongam e deslocam-se através do solo, exercendo uma força suficiente para sobrepor as restrições mecânicas ao seu crescimento. Deste modo, quanto maior a resistência, maior a energia dispendida pela raiz para se desenvolver.

O aumento na resistência do solo traz, como consequência, efeitos sobre o crescimento radicular, principalmente sob condições climáticas adversas. A compactação excessiva do solo pelo tráfego e sua persistência quando da ausência de preparo, reduzem drasticamente a proliferação de raízes no solo (BOWEN, 1981), principalmente em sistemas de preparo mínimo e direto (NESMITH et al. 1987). Nestes as forças naturais têm pouco efeito na recuperação da estrutura do solo (VOORHEES, 1983), devido o grau de adensamento que o solo atinge com a ausência do revolvimento. A identificação de valores de IC a campo e sua relação com valores restritivos ao crescimento

radicular é difícil para a maioria dos solos. Isto ocorre porque grande parte dos dados disponíveis provêm de experimentos, que identificaram os valores de IC no qual a raiz praticamente cessou ou teve sua taxa de elongação seriamente reduzida (GERARD, 1982). Os valores limitantes ao crescimento radicular variam com o tipo de penetrômetro utilizado, com a forma de expressar os resultados, com o grau de desenvolvimento hierárquico da estrutura do solo e também, segundo GOSS (1977), com a espécie de planta. A pressão de crescimento radicular varia, na maioria das culturas, desde 0.9 até 1.3 MPa (MISRA et al., 1986).

TAYLOR e RATLIFF (1969a) demonstraram que a velocidade de elongação das raízes de algodão e amendoim foi reduzida em 50%, para valores de IC acima de 0.7 e 2.0 MPa, respectivamente. LOWRY et al. (1970) concluíram que a produtividade do algodão foi substancialmente reduzida devido a presença de uma camada artificialmente compactada com IC de 0.80 MPa em diversas profundidades enquanto que TAYLOR e GARDNER (1963) determinaram que, quando a resistência excedeu aproximadamente 2.0 MPa, não houve penetração de raízes de algodão no solo. TAYLOR e BURNETT (1964) e TAYLOR et al. (1966) obtiveram um valor de resistência do solo entre 2.0 e 3.0 MPa, na capacidade de campo, como o limite crítico que alterou de maneira drástica o crescimento de raízes de algodão. GERARD et al. (1972) demonstraram que a taxa de elongação de raízes de feijão foi reduzida em 50% quando a resistência do solo

atingiu 2.0 MPa, sendo que as raízes de algodão cessaram o crescimento com resistência de aproximadamente 2.5 MPa. NESMITH et al.(1987) também encontraram valores críticos de IC próximos ou excedendo 2.0 MPa, para a cultura da soja. Este valor tem sido mencionado como impeditivo ao crescimento radicular de muitas culturas (TAYLOR e RATLIFF,1969a; TAYLOR et al.1966; CAMPBELL et al.,1974). Já HENDERSON (1989) adotou como crítico, um IC de 1.0 MPa em modelos para prever os efeitos da compactação sobre o crescimento e produção de trigo, na Austrália.

VEEN E BOONE (1990) obtiveram resultados em que o crescimento de raízes de milho foi completamente inibido num solo, quando a resistência ao penetrômetro atingiu 4.2 MPa e o potencial de água -1.7 MPa, sugerindo que o potencial de água no solo adiciona efeitos a resistência mecânica. Sob baixas resistências, o crescimento de raízes é inibido por mudanças na estrutura da parede celular, induzida pela resistência do solo (VEEN,1982).

O maior desenvolvimento da raízes laterais em solos compactados ocorre quando o tamanho de poros restringe o crescimento longitudinal, mas não o lateral (GOSS e RUSSEL,1980). VEPRASKAS e MINNER (1986), ao avaliarem o efeito da impedância mecânica sobre o crescimento de raízes de fumo, notaram que a taxa de elongação de raízes diminui progressivamente com o aumento do IC de 0 até 3.2 MPa, ainda crescendo entre 2.8 e 3.2 MPa, e atingindo taxas de

elongação igual a zero quando o IC foi de 4.0 Mpa. GRAHAM et al.(1986) sugerem que o restrito crescimento de raízes em solos compactados com aproximadamente 5% de macroporos e resistência à penetração > 1.4 MPa, é devido a resistência do solo e má aeração, quando comparado com solo não compactado.

Outros métodos têm sido utilizados para determinar o ambiente para o crescimento radicular. GOSS (1977) demonstrou que as raízes de cevada foram drasticamente alteradas por baixas pressões no solo, resultando em 50% e 80% de redução no crescimento radicular com pressões de 0.02 e 0.05 MPa aplicadas ao meio de crescimento artificial. Estas pressões são baixas comparadas as pressões máximas as raízes podem exercer.

A maior resistência do solo associada ao decréscimo na aeração dos solos compactados limita o crescimento e funcionamento das raízes (BARLEY, 1962). Uma interação entre a presença de camadas compactadas e o intenso desenvolvimento de raízes acima destas foi obtida por ASADY e SMUCKER (1989). Um decréscimo na taxa de difusão de oxigênio (TDO) abaixo de um nível crítico ocorreu quando a densidade do solo (VERTISSOLO) foi de 1.77 g/cm³. O mesmo aconteceu quando houve um acúmulo de raízes, independentemente da densidade do solo. Estes resultados demonstram as complexas interações entre a resistência mecânica, aeração e raízes, onde mecanismos fisiológicos estão envolvidos (GOSS e RUSSEL, 1980). A concentração de raízes na superfície,

comum em solos compactados, também foi verificada sob condições de laboratório (GOSS, 1977; CINTRA e MIELNICZUCK, 1986). HUCK (1970) e BLACKWELL et al. (1985) também sugerem que, além da resistência mecânica dos solos compactados, a baixa capacidade de aeração reduz drasticamente a elongação das raízes. Por outro lado, a presença de poros com diâmetros maiores que os das raízes, poderia possibilitar o crescimento delas em zonas de alta resistência (AUBERTIN e KARDOS, 1965). Sob condições mais úmidas, o crescimento das raízes é afetado pela aeração deficiente; já em condições de déficit hídrico, a impedância mecânica poderá dificultar a penetração das raízes no solo, reduzindo as taxas de absorção de água e nutrientes (BOONE et al., 1986). No campo, é difícil estudar os efeitos da impedância mecânica sobre o crescimento radicular devido a fatores complicadores, como a variabilidade espacial do solo, restrição no fornecimento de água, oxigênio e nutrientes às raízes (BENGHOUGH e MULLINS, 1990b).

A utilização da densidade do solo tem sido proposta como um parâmetro para explicar o crescimento de raízes. THOMPSON et al. (1987) citam autores que apoiam seus estudos de crescimento radicular no conceito de densidade crítica do solo, como o parâmetro que melhor caracteriza o crescimento de raízes em solos compactados. Por outro lado, GROENEVELT et al. (1984) demonstraram a fragilidade da densidade do solo como um indicador das condições para o crescimento radicular, visto que as raízes podem crescer ao redor de

agregados compactos, independente da densidade do solo. A proporção do comprimento total de raízes que penetram os agregados diminui com o aumento do tamanho e resistência dos agregados (MISRA et al., 1988).

De maneira geral, o efeito marcante da resistência do solo sobre o crescimento radicular ocorre quando os outros fatores de crescimento radicular estão em níveis satisfatórios (TAYLOR, 1974). Os resultados da literatura demonstram que a impedância mecânica obtida através de penetrômetros pode ser usada satisfatoriamente para prever os efeitos de diferentes sistemas de manejo do solo, sobre o crescimento radicular

1.6. Relações da Resistência à Penetração com os Sistemas de Preparo do Solo.

Duas tendências atuais nas práticas agrícolas requerem uma avaliação da eficiência relativa do preparo e forças naturais na minimização da compactação do solo (VOORHEES, 1979): a primeira é em relação a máquinas agrícolas maiores e mais pesadas, com elevado potencial para compactação; a segunda diz respeito ao crescente uso de sistemas de preparo mínimo e plantio direto, os quais têm uma forte dependência de forças naturais para que os níveis de compactação não sejam restritivos à produção agrícola. O preparo poderá produzir uma ação de compactação em maior ou menor intensidade dependendo do tipo de solo, umidade no momento de aplicação da carga e da operação de preparo (VOORHEES, 1985).

O efeito de ciclos de secagem e umedecimento e outros fatores naturais tem efeito limitado à profundidade de até 25cm (BLAKE et al.,1976). Os ciclos de secagem e umedecimento atuam como forças físicas na formação de novos agregados do solo (LYNCH e BRAGG,1985), os quais são importantes nos sistemas agrícolas, contribuindo para modificações nas condições físicas do solo através de formação de zonas de menor resistência e de maior porosidade na matriz do solo (BLACKWELL et al.,1984; DEXTER,1983). ONOFIUK(1988) detectou uma redução na densidade do solo e resistência à penetração provocada por ciclos de secagem e umedecimento em áreas trafegadas. Nas áreas não trafegadas, o acréscimo nos valores destes parâmetros em superfície deve-se à ação de cargas aplicadas pelo impacto de gotas durante as chuvas. O sistema de plantio direto, dependendo do tipo de solo, culturas e condições climáticas, pode resultar num solo superficialmente mais compacto em função da ausência de preparo do solo, associado à incapacidade das forças naturais induzidas por variações climáticas, e.g. ciclos de secagem e umedecimento, em reduzir a compactação do solo devido ao tráfego (VOORHEES,1983). As possíveis consequências desta maior compactação em superfície incluem desde a dificuldade na operacionalização da semeadura, atraso e desuniformidade na germinação, além de condições impróprias para o crescimento de raízes no solo (VOORHEES et al.,1985).

Algumas formas de preparo podem minimizar significativamente a resistência na camada preparada (RADCLIFFE et al., 1989; BUSSCHER et al., 1988; CASSEL et al., 1978; HILL, 1990), mas a compactação residual e persistente abaixo da camada preparada pode ter efeitos detrimenais sobre a produção agrícola (VASQUEZ et al., 1989). O tráfego de máquinas maiores e mais pesadas resulta em camadas compactadas de alta resistência à penetração abaixo da zona preparada (MECK et al., 1988).

BAUDER et al. (1981) indicam que o tráfego é a causa primária da compactação do solo, em sistemas de preparo mínimo, ao passo que NESMITH et al. (1987) indicam que o preparo inicial do solo é o fator mais importante. Em solos compactados o crescimento de raízes fica restrito a poucos centímetros de profundidade (GARCIA et al., 1988), tornando as culturas mais sujeitas às instabilidades climáticas. A presença de camadas compactadas reduz a quantidade de água disponível para o crescimento das plantas, ao reduzir a profundidade de enraizamento (LOWRY et al., 1970).

Há resultados de literatura confirmando que grande parte das modificações físicas dos solos, após o preparo, ocorre por ocasião das primeiras passadas do maquinário (VOORHEES, 1978; CULLEY e LARSON, 1987; MEEK et al., 1988; BLACKWELL et al., 1989). O valor final da densidade do solo depende da magnitude de carga aplicada e do conteúdo de água do solo no momento da aplicação (GUPTA e LARSON, 1982).

CULLEY e LARSON (1987) concluíram que a compressão do solo, logo após o preparo, inicia-se na porção correspondente à curva de compressão virgem do solo, como se o solo ainda não tivesse sido submetido a carga alguma, indicando uma grande susceptibilidade à compactação excessiva após o preparo. CULLEY et al. (1987) também evidenciaram que o efeito do tráfego, devido a semeadura e aplicação de herbicida, foi suficiente para eliminar os efeitos benéficos do preparo primário e secundário do solo sobre o IC e densidade do solo, demonstrando que grandes modificações nas propriedades físicas do solo ocorrem nas primeiras passadas de máquinas na área. Deste modo, para as cargas usuais de 0.3 a 0.4 MPa, exercida pelas máquinas agrícolas, o maior potencial de compactação ocorre nas primeiras passagens de veículos agrícolas na área, notadamente quando a umidade é alta.

O tráfego tem um efeito marcante na alteração das propriedades físicas do solo, com consequente aumento na resistência à penetração e densidade do solo, e decréscimo na porosidade de aeração (BLACKWELL et al., 1985). Os incrementos na densidade do solo e na resistência à penetração após o tráfego não são maiores devido ao efeito residual de passagens anteriores, mas no final de alguns anos a densidade do solo e resistência à penetração são mais elevados nos solos com plantio direto, principalmente em superfície (CAMPBELL et al., 1986). SOANE e PIDGEON (1975) mencionam que o solo, em sistema de plantio direto, torna-se pré-compactado e resistente o suficiente para suportar os

efeitos de tráfego posteriormente aplicado. Os efeitos de diferentes sistemas de preparo e tráfego podem ser quantificados através da resistência à penetração do solo (ONI E ADEOTI, 1986). Também GERARD et al. (1982) e TAYLOR et al. (1966) sugerem que a avaliação periódica da resistência à penetração pode ser um método apropriado e prático para determinar a necessidade de revolvimento profundo do solo e avaliar os efeitos do manejo e sequência de culturas sobre as propriedades físicas do solo.

O decréscimo na produtividade com o aumento na resistência do solo tem sido documentado por vários pesquisadores em algumas culturas de interesse comercial (LOWRY et al., 1970; PHILIPS e KIRKHAM, 1962). A redução na produtividade torna-se maior quando a elevada resistência do solo acentua o déficit hídrico, a deficiência de minerais e a aeração do solo (TAYLOR, 1974). Portanto, a utilização de sistemas de preparo com pouca mobilização do solo podem resultar em solos mais compactados, cujas propriedades físicas não oferecem um ambiente radicular apropriado para o adequado desenvolvimento e funcionamento das raízes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS.

2.1. Localização do Experimento e Caracterização do Solo.

O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Cooperativa Batavo, no município de Ponta Grossa, Estado do Paraná. O solo é classificado como um LATOSSOLO VERMELHO ESCURO distrófico, derivado de material geológico composto por resíduos intemperizados de rochas sedimentares de

natureza argilosa. A área em questão encontra-se sob clima do tipo Cfb, de acordo com a classificação de Koeppen (GODOY et al., 1976). As análises granulométricas e de densidade de partículas foram realizadas em amostras coletadas após a instalação do experimento, para os diferentes métodos de preparo. Os resultados obtidos estão apresentados nos quadros 1.1 e 1.2 (respectivamente granulometria e densidade de partículas, anexo 1), mostrando uma relativa uniformidade no perfil amostrado. A caracterização química do solo (quadro 1.3, em anexo) foi realizada sobre amostras obtidas antes da instalação do experimento. As análises físicas e químicas foram realizadas utilizando metodologia descrita por Embrapa (EMBRAPA, 1979).

2.2. Tratamentos utilizados.

Os tratamentos aplicados às parcelas experimentais constam do quadro 1, abaixo. Em todas as parcelas experimen-

QUADRO 1. Tratamentos de preparo, calagem e tráfego aplicados na instalação e condução do experimento.

MÉTODOS DE PREPARO	(A) arado de discos a 20 cm de profundidade; (B) arado de alvecas a 35 cm de profundidade; (C) arado rotativo a 60 cm de profundidade;
NÍVEIS DE CALAGEM	(C) calcário suficiente para 70% de saturação do complexo de troca; (SC) sem calcário adicional;
NÍVEIS DE TRÁFEGO	(CT) faixas com tráfego cumulativo de trator e colhedeira; (ST) Faixas permanentemente sem tráfego;

tais foi incorporado fertilizante fosfatado YOORIN numa dose suficiente para atingir 15 ppm de fósforo no solo. O controle do tráfego foi feito em todos os tratamentos a partir da semeadura da primeira cultura. Deste modo, criou-se faixas com e sem tráfego. Todo o tráfego de trator e colhedeira foi orientado por marcos permanentes, indicando o centro de cada parcela.

2.3. Sistema de Cultivo e Manejo das Culturas.

Em todos os tratamentos, após o preparo primário do solo e incorporação de corretivos e fertilizantes, foi realizado uma gradagem leve e executado o plantio da primeira cultura da rotação (quadro 2) conduzida em sistema de plantio direto durante o transcorrer do experimento.

QUADRO 2. Rotação de culturas utilizadas

durante o período de duração do experimento.

	INVERNO	VERÃO
SAFRA 1989/1990	ervilhaca	milho
SAFRA 1990/1991	aveia preta	soja

O sistema de plantio direto para todas as culturas foi conduzido de acordo com os padrões tecnológicos utilizados pelos agricultores na região dos Campos Gerais.

Para o plantio de milho e soja utilizou-se uma plantadeira marca SEMEATO PAR 2800 e semeadeira marca MENEGAZ para a semeadura da ervilhaca e aveia preta. O controle de ervas daninhas, pragas e doenças foi feito através de métodos químicos convencionais. A colheitadeira de marca SLC 3200 foi utilizada com 3/4 da carga total e equipada com picador e distribuidor de palha. O controle de tráfego permitiu que todas as operações fossem conduzidas sobre uma mesma faixa. As diferenças de bitola entre trator e colheitadeira foram compensadas, fazendo com que o tráfego do trator e colheitadeira fossem cumulativos apenas no rodado direito. Nesta faixa foram feitas amostragens correspondentes a área trafegada durante a duração do experimento.

2.4.Determinação da Resistência à Penetração do Solo.

Antes da instalação do experimento foi determinada a resistência à penetração em sete pontos de uma transeção diagonal à área. Os pontos foram agrupados em três blocos, correspondente aos blocos do experimento. Simultaneamente foram retiradas amostras para determinação do conteúdo de água no solo. O propósito desta amostragem previamente a instalação do experimento foi de evitar que conclusões futuras fossem comprometidas, principalmente porque há evidências de que o efeito de preparo e manejo anterior

poderá persistir na forma de camadas adensadas subsuperficiais (RADCLIFFE et al., 1988).

A resistência à penetração do solo foi determinada com um penetrômetro cônico modelo SOLOTEST S310, com ângulo de penetração de 30º e área da base do cone de 6.33 cm². Amostras deformadas para determinação da umidade gravimétrica nas profundidades amostradas foram coletadas simultaneamente.

No decorrer do trabalho as amostragens de resistência à penetração foram feitas em seis pontos por tratamento: três pontos numa linha sem tráfego e três outros na linha com tráfego, na porção média das entre-linhas das culturas, até a profundidade de 60cm em incrementos de 5cm, de acordo com BRADFORD (1986). Por motivos operacionais as amostragens foram feitas sempre um ou dois dias após uma chuva suficiente para umedecer todo o perfil amostrado. No cálculo da resistência à penetração, os valores brutos obtidos a campo foram transformados em resistência à penetração através da equação abaixo, obtida da calibração de fábrica do penetrômetro:

$$(1) \quad IC = 0.000855 + 0.559*(Ld)$$

onde, IC é índice de cone (MPa), e Ld é a leitura obtida no campo (mm)

Os resultados de resistência à penetração são expressos através do índice de cone (IC), o qual estabelece uma relação entre a força necessária para penetrar um cone no solo e a área basal do cone (BRADFORD, 1986). Foi

desenvolvido junto à área experimental, um trabalho específico para proceder a calibração dos valores de resistência à penetração em relação ao conteúdo de água e densidade do solo, demonstrado pela literatura consultada como a relação mais comumente encontrada. Foram estabelecidas faixas com densidade do solo diferentes, e após os tratamentos implantados fez-se uma irrigação para umidecimento uniforme do perfil. As amostragens foram feitas no decorrer da drenagem, obtendo variações do conteúdo de água com o tempo. Após a coleta dos dados foram obtidas equações de regressão que possibilitaram obter a melhor correlação entre as variáveis. A equação que apresentou melhor coeficiente de determinação foi utilizada para a correção dos dados.

Com objetivo de melhor identificar a magnitude dos fatores atuantes, o perfil amostrado até 60 cm foi dividido em cinco intervalos de profundidade: 0-5, 5-10, 10-20, 20-35 e 35-60 cm. Em cada intervalo de profundidade foi tomado o valor máximo de resistência à penetração. Este procedimento teve o propósito de levar em consideração o fato de que para uma raiz penetrar as camadas inferiores, ela deve superar a resistência máxima da camada superior (CASSEL et al., 1978). Desta forma, cada profundidade foi considerada um tratamento específico, de modo que a comparação entre os tratamentos não foram feitas entre as profundidades, mas para cada

profundidade em particular. Os valores de IC corrigidos foram utilizados no tratamento estatístico dos resultados.

As determinações de resistência à penetração foram feitas nos seguintes períodos:

(a)jun-89, após o plantio da ervilhaca;

(b)ago-89, após o plantio do milho;

(c)dez-89, na antese do milho;

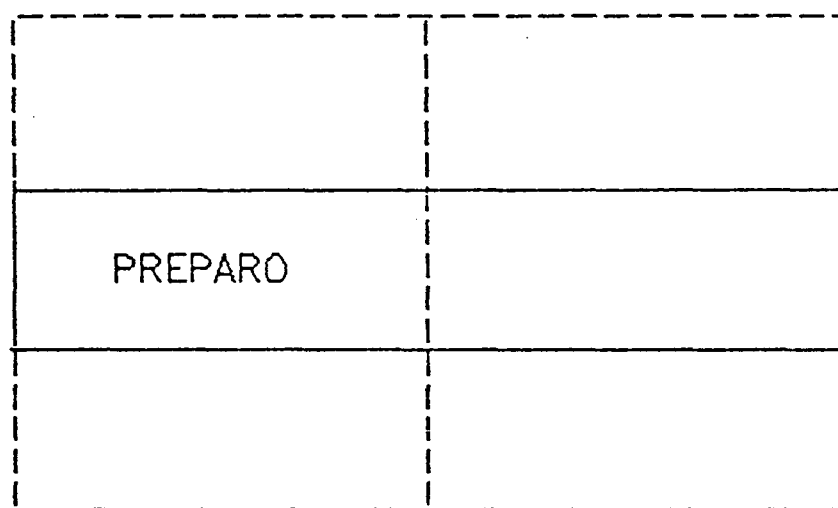
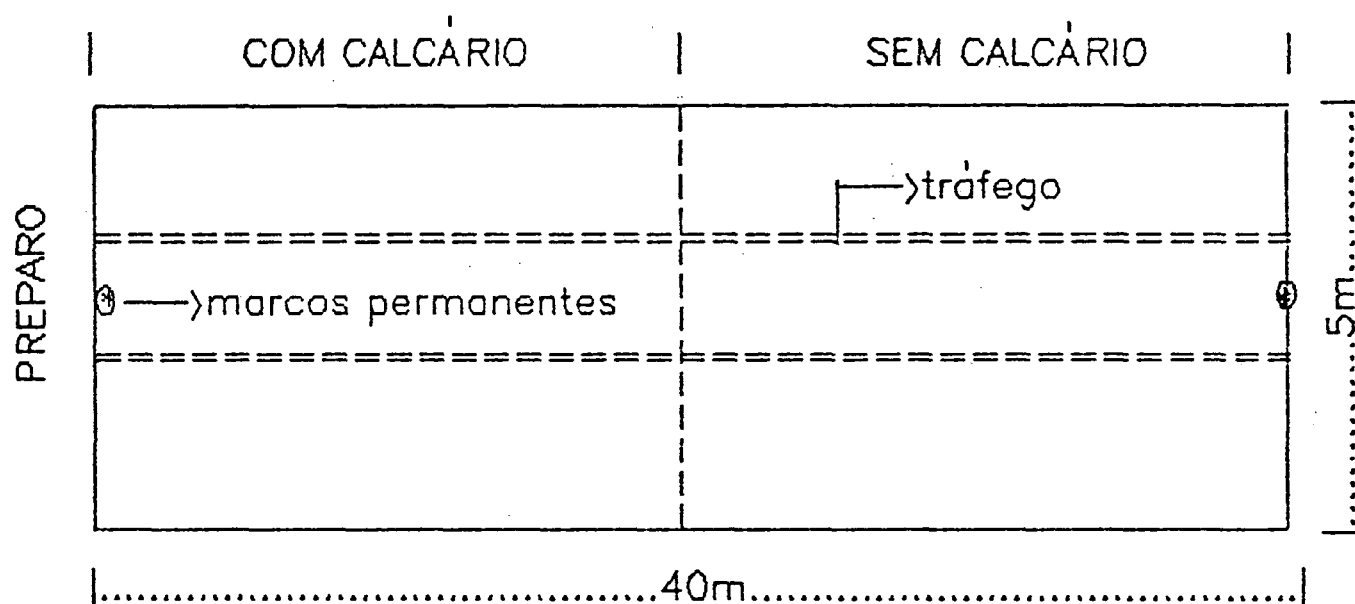
(a)abr-90, após a colheita do milho;

(a)mai-91, após a colheita da soja;

2.5. Desenho Experimental e Análise Estatística.

As parcelas de preparo e tráfego possuíram dimensões de 40 X 5 metros, subdivididas em dois níveis de calagem: com e sem calcário adicional. Todos os tratamentos foram repetidos em três blocos ao acaso que compõem a área experimental numa disposição "split-split-plot", sendo o preparo do solo como o tratamento principal e os níveis de calcário e tráfego como sub tratamentos. Para facilitar a análise dos resultados, os tratamentos foram comparados por profundidade e cada profundidade como um tratamento adicional em função do procedimento descrito no item anterior. Após os dados serem submetidos ao processo de calibração e obtidos os valores corrigidos para as variáveis independentes, os mesmos foram submetidos à análise estatística.

A análise estatística dos dados foi feita utilizando o programa estatístico SYSTAT (WILKINSON, 1987). Os dados



BLOCO DE TRATAMENTOS

Figura 1. Croquis da parcela experimental

foram submetidos a análise de variância e após esta análise foi feita a comparação de médias através do teste de Tukey, com $p=0,05$.

3.RESULTADOS

3.1.Calibração do Penetrômetro.

Existe ampla evidência da dependência da resistência à penetração em relação a outras propriedades físicas do solo, independente do tamanho e tipo de penetrômetro utilizado. Esta dependência dificulta a análise dos resultados pela impossibilidade de certificar se estes ocorrem devido aos efeitos dos tratamentos ou variações daquelas propriedades físicas.

Com objetivo de corrigir os valores de IC para condições padrões, um trabalho específico próximo a área experimental foi conduzido, onde os valores de IC, densidade do solo e conteúdo gravimétrico de água foram obtidos. Devido a pequena quantidade de valores amostrados, não foi possível obter boas correlações deste experimento. Assim, seleccionou-se dados da coleta realizada em 04/90 (com e sem tráfego), dos quais obteve-se equações de regressão, englobando todas as profundidades amostradas. As equações de regressão com melhores coeficientes de determinação são mostradas no quadro 3.

A equação de regressão com duas variáveis independentes, densidade do solo e conteúdo gravimétrico de

QUADRO 3. Equações de regressão para calibração do
penetrômetro.

(1)	$IC = -4.188 - 4.389 \ln U$	$n=60$	$R^2=0.63$
(2)	$IC = -1.424 + 1.982 D_s$	$n=60$	$R^2=0.66$
(3)	$IC = 1.274 + 1.284 D_s - 5.978 U$	$n=60$	$R^2=0.69$
(4)	$D_s = 3.102 - 6.145 U$	$n=60$	$R^2=0.72$

IC=índice de cone (MPa)

U=conteúdo de água (g/g)

D_s=Densidade do solo (g/cm³)

água mostrou a melhor correlação com a resistência à penetração ou índice de cone. No entanto, a análise dos resultados mostrou que a densidade do solo é dependente do conteúdo de água por ocasião da amostragem, e por isso não foi utilizada.

Para as equações relacionando resistência à penetração e uma variável independente, a densidade do solo e/ou conteúdo gravimétrico de água, as correlações obtidas foram bastante semelhantes, com $R^2=0.66$ e 0.63 , respectivamente. Uma vez que não foi possível obter a densidade do solo em todas as amostragens de penetrometria, optou-se pela relação entre IC e log natural do conteúdo de água no solo para proceder a calibração do IC para um valor padrão de umidade.

Ao proceder a correção da resistência à penetração em relação ao conteúdo de água do solo para densidades do solo entre 1,31 e 1,40 g/cm³, Voorhees (1983), utilizou uma equação semelhante com $R^2=0.54$, ainda menor ao obtido neste experimento. Este procedimento possibilitou evidenciar melhor os efeitos dos tratamentos. Há indicações de que o comportamento da resistência do solo com outras propriedades físicas, adquire uma relação universal, e estudos específicos desta dependência poderiam ser conduzidos para vários tipos de solos. No caso específico deste trabalho, a correção dos valores de IC em relação a um valor padrão de umidade facilitará a compreensão dos mecanismos atuantes sobre a estrutura dos solo.

A correção do IC foi realizada para um valor padrão de conteúdo de água de $0.34(+/-0.04)$ g/g, tomado como o valor médio obtido durante a sequência de amostragens realizadas no campo. O conteúdo de água mostrou pouca variação entre as profundidades e o valor padrão adotado resultou em pequenos desvios para a correção do IC. Este valor adotado está abaixo do conteúdo de água na capacidade de campo, arbitrariamente determinada sob um potencial de -0.006 MPa, o qual foi de 0.46 g/g.

Assim, havendo diferenças no conteúdo de água medido a campo por ocasião das amostragens, em relação ao valor padrão, as diferenças resultantes no IC foram adicionadas ou subtraídas do IC originalmente obtido. Assumiu-se que os

valores de IC corrigidos são expressões reais dos efeitos dos tratamentos. Aos valores assim corrigidos foram aplicados os conceitos estatísticos para a comparação dos efeitos dos tratamentos e avaliar as modificações ocorridas no solo.

3.2. ESTADO ANTERIOR.

A caracterização dos efeitos relativos à história anterior de tráfego e preparo na área experimental foi realizada através da amostragem antes da implantação do experimento (Fig.2). Os resultados demonstram uma relativa uniformidade do IC na área experimental, apesar de não ter sido possível identificar áreas com e sem tráfego

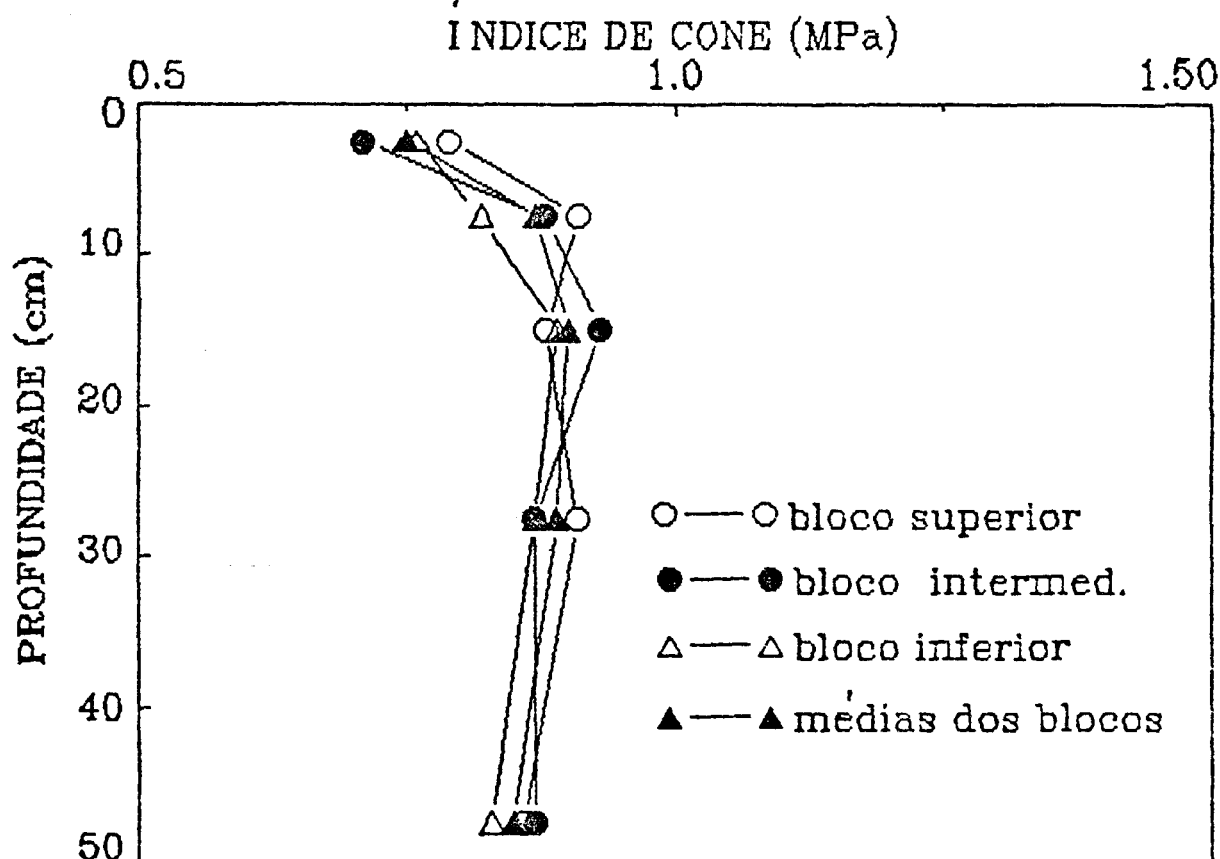


FIG.2. Índice de cone antes da instalação do experimento.

nesta amostragem. O pico de resistência à penetração entre as profundidades de 0-5 e 5-10 cm é possivelmente reflexo dos efeitos da aração convencional e uso da grade pesada no preparo do solo.

As magnitudes não muito elevadas do IC podem ser devido ao efeito do tempo de pousio (aproximadamente seis meses) em que a área permaneceu até a instalação do experimento, o qual pode ter contribuído para a redução da resistência do solo, principalmente em superfície. A identificação destas camadas compactadas e sua eliminação, são pré-requisitos fundamentais na implantação do sistema de plantio direto (IAPAR, 1981).

3.3. Efeitos dos Tratamentos por Profundidade.

PROFUNDIDADE DE 0-5cm.

Após a instalação do experimento, a sequência de amostragens permitiu que os dados obtidos representassem os efeitos da reorganização da estrutura sob diferentes graus de mobilização física inicial, correção do solo e também do efeito do tráfego, cumulativo no tempo, culminando com a aplicação das cargas máximas pelo tráfego de colheitadeiras carregadas. A umidade por ocasião dos tráfegos não foi determinada.

A análise de variância do IC foi realizada para cada profundidade e data de coleta. O quadro 1.4 (anexo 1) resume a análise de variância dos dados. As figuras 3, 4 e 5, resumem a comparação das médias dos tratamentos para todas profundidades e datas de coleta.

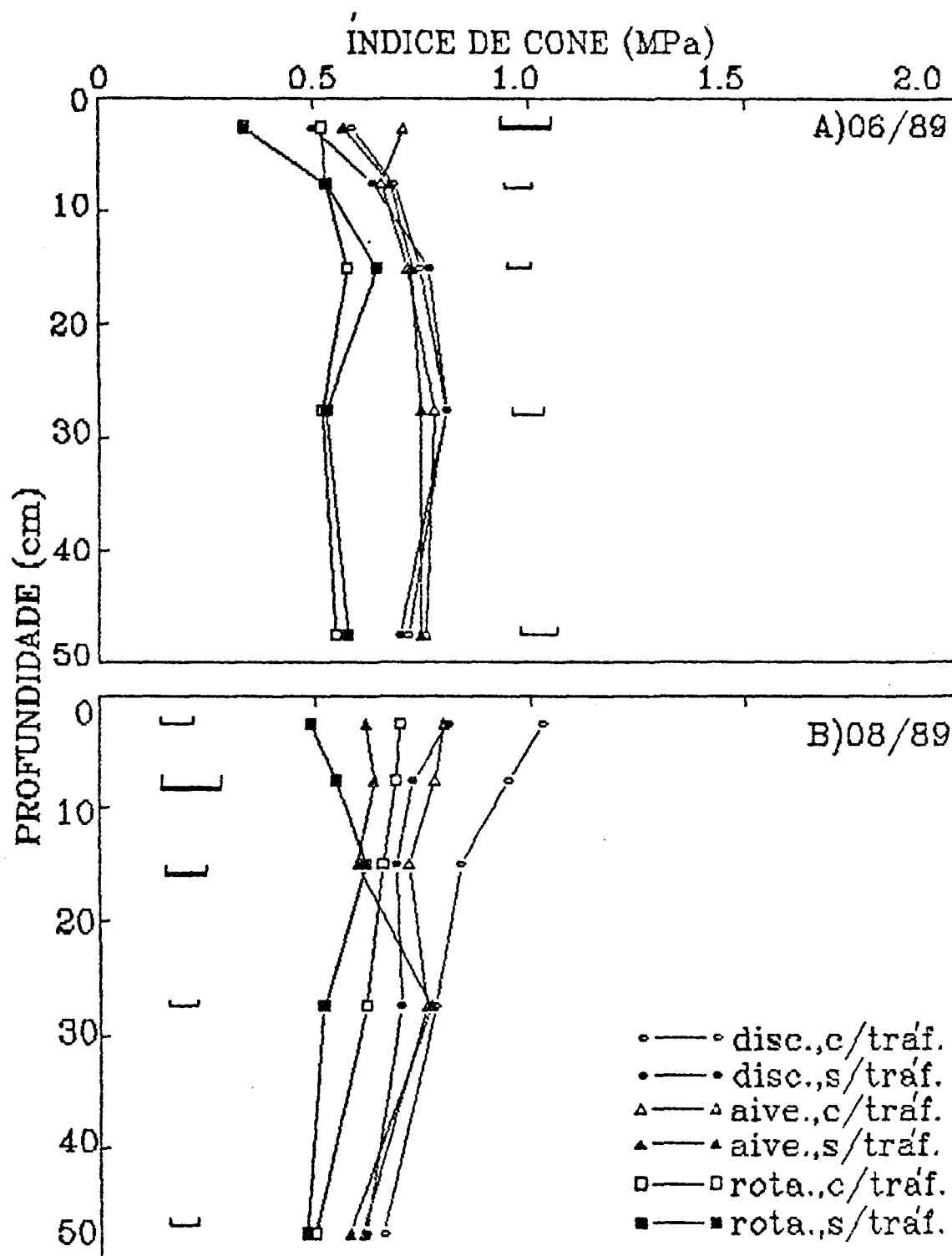


FIG.3. Índice de cone nas coletas realizadas em 06/89(A), 08/89(B). As barras significam as diferenças mínimas significativas entre as médias (Tukey $p=0.05$).

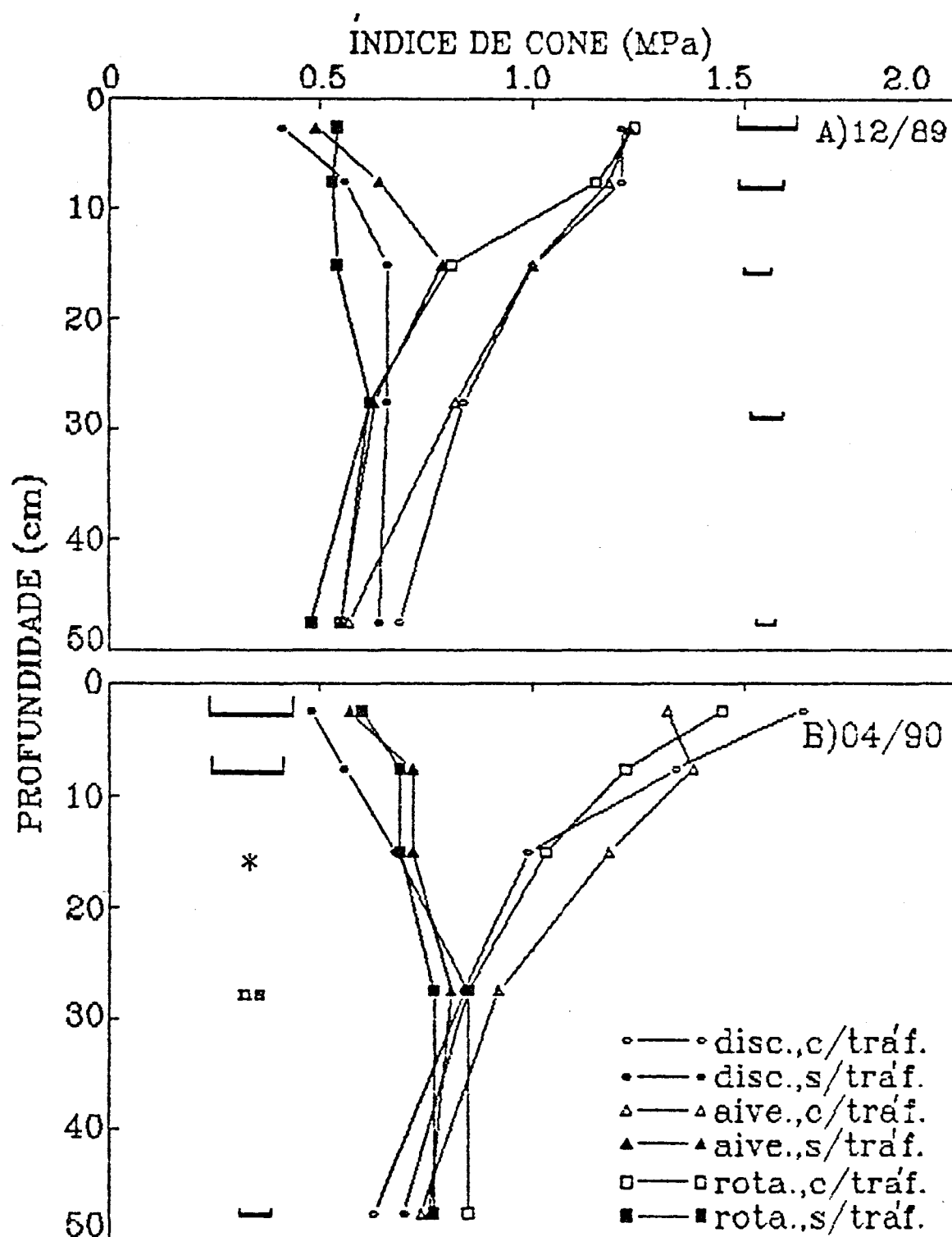


FIG.4. Resultados de índice de cone na amostragem realizada em 12/89 e 04/90. Obs.* interação preparo e tráfego

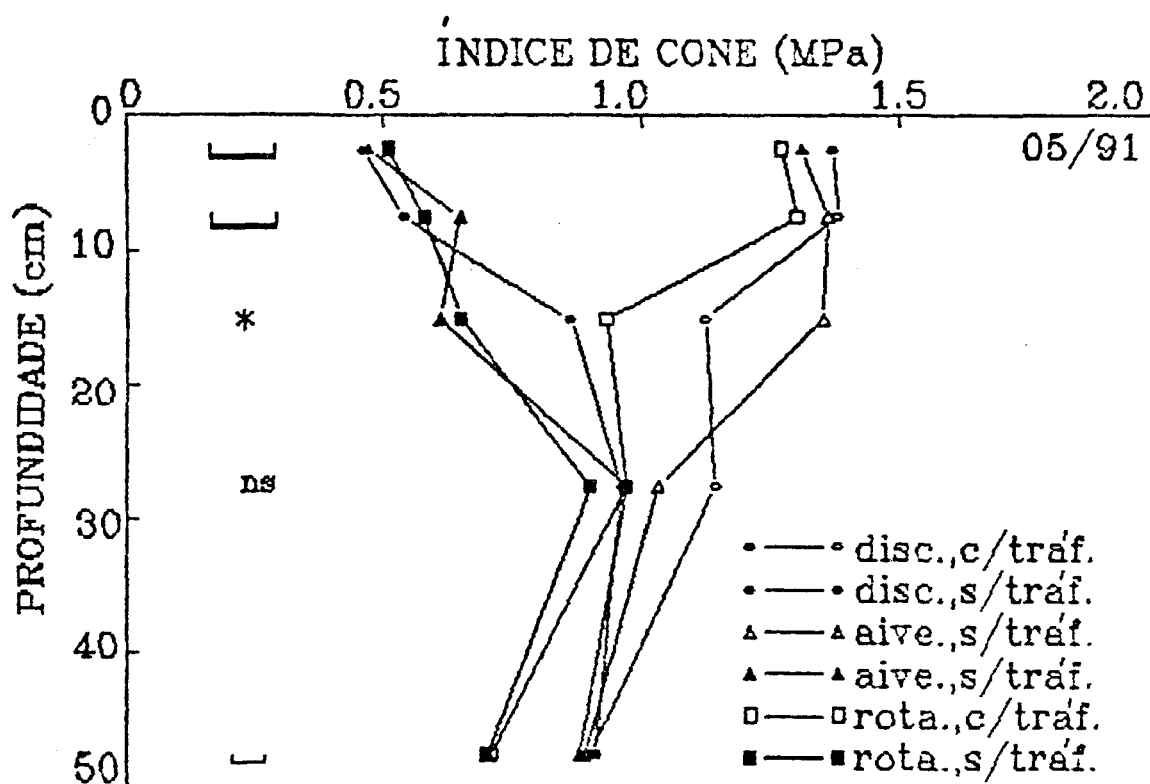


FIG.5. Resultados de índice de cone na amostragem realizada em 05/91. Obs. * interação preparo e tráfego

A análise estatística não evidenciou diferenças devido ao calcário (resultados não apresentados). Portanto, estes dados foram incorporados aos de preparo, sem distinção. Inicialmente, o preparo com arado de alvecas a 35cm apresentou o maior índice de cone na área trafegada, diferindo dos dois outros métodos de preparo empregados; e na área sem tráfego, os preparos com arado convencional e alvecas diferiram do preparo com arado rotativo, sendo que o último apresentou o menor IC. Isto demonstra que há um comportamento distinto dos preparos em relação as

primeiras entradas de máquinas na área. O preparo com arado de alvecas, até este período, apresentou uma estrutura mais frágil, possivelmente devido ao efeito da inversão da leiva, expondo o horizonte subsuperficial com estrutura mecanicamente mais fraca, além da diluição da matéria orgânica no perfil, culminando assim com a dificuldade de retificação da estrutura do solo, em superfície. O preparo com arado rotativo a 60 cm, apesar de teóricamente possuir o maior potencial de compactação devido ao maior provável índice de compressão (LARSON et., 1980), não se comportou desta forma, possivelmente devido as magnitudes de cargas aplicadas e da

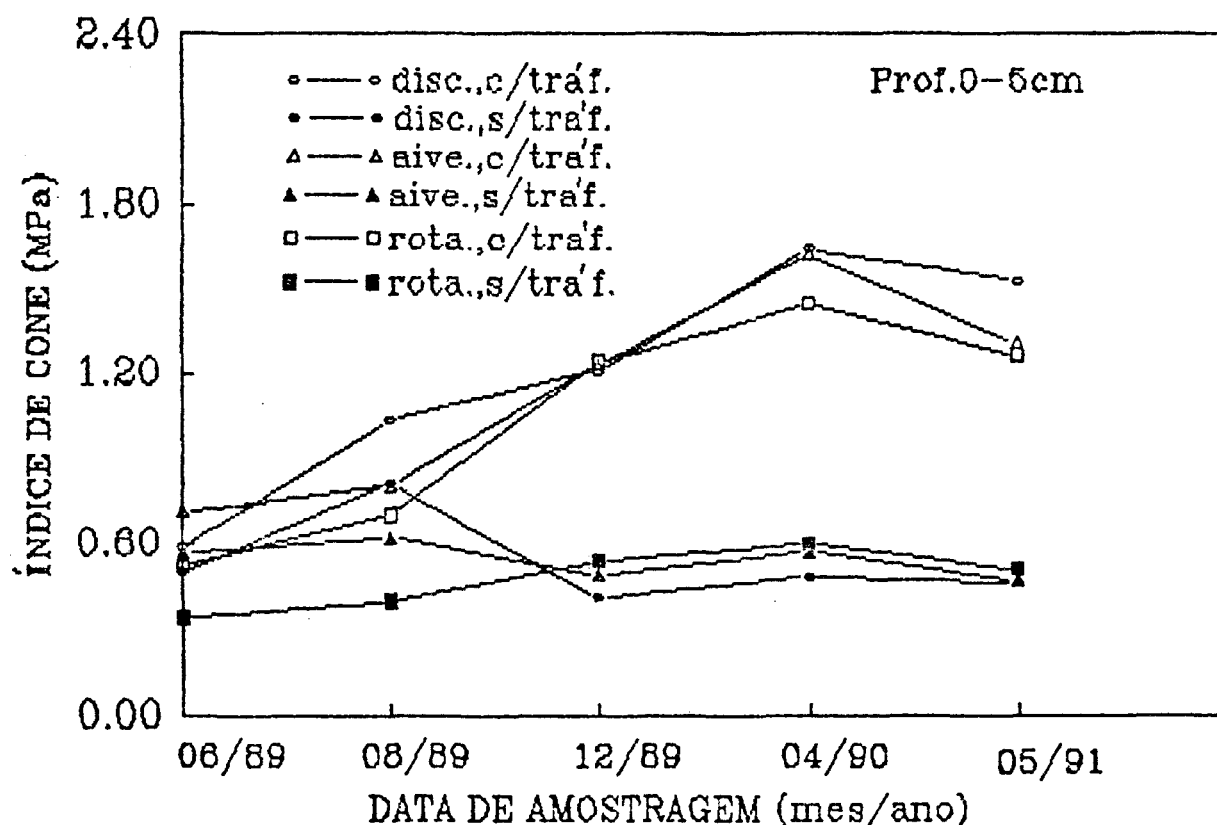


Fig. 6. Variação do Índice de Cone na profundidade de 0-5 cm em função das épocas de amostragem.

ausência de confinamento imposta por camadas adensadas em subsuperfície, removidas pelo preparo profundo do solo. Já na coleta realizada em 08/89, o preparo convencional com discos apresentou IC 67% e 61% maior que o preparo rotativo, nas áreas com e sem tráfego, respectivamente. Com o aumento no número de entradas de máquinas na área, o efeito de confinamento das camadas adensadas pela compactação de subsuperfície, foi provavelmente o fator responsável pelo aumento no IC no preparo convencional com discos na profundidade de 0-5 cm. Como já enfatizado, não foi realizado nenhuma determinação do conteúdo de água durante cada tráfego, o qual é outro fator que poderia ter influenciado as diferenças obtidas, se houvessem diferenças na retenção de água, condicionada pelos diferentes graus de mobilização impostos ao solo.

As coletas realizadas a partir de 08/89 apresentaram efeitos devido a atuação do tráfego. O tráfego de máquinas resultou numa compactação do solo como demonstrado pelas médias do IC em relação as áreas não trafegadas. Existe um aumento cada vez maior no IC com o tempo devido ao efeito cumulativo do tráfego (fig.6). As diferenças no IC nos tratamentos com e sem tráfego foram de 25, 28%, 171%, 185% e 191% a favor do tráfego da primeira para a última coleta. Nesta fase o preparo a 20 cm de profundidade apresentou-se mais adensado, com IC 47% maior que no preparo a 60 cm, o qual não foi diferente do preparo a 35 cm de profundidade. O aumento na resistência à penetração com o aumento no número

de passadas de máquinas foi também evidenciado por outros pesquisadores (ONI e ADEOTI, 1986).

Com a evidência do comportamento temporal do IC, foi realizada uma segunda análise de variância do IC com os tratamentos de preparo, tráfego e data de coleta como sendo o novo fator de variação. O resumo dos resultados obtidos desta análise estão apresentados no quadro 1.5 (anexo 1). Os resultados demonstraram que há diferenças entre as datas de coleta, confirmando as evidências obtidas anteriormente. Houve também uma interação positiva entre data de coleta e método de preparo do solo. Isto confirma a hipótese da variação temporal do IC em função da intensidade com que ocorrem os processos de adensamento do solo. Em superfície (fig.6), o IC na área trafegada não demonstra ter estabilizado no tempo. Há um decréscimo significativo no IC entre a penúltima e a última coleta, o qual pode estar associado ao efeito da cultura de aveia, utilizada como cultura de cobertura no inverno. A cultura da aveia possui um sistema radicular vigoroso e denso, com muitas raízes finas capazes de explorar agregados mais densos (LINCH e BRAGG, 1985; OADES, 1984). Além disso, o efeito de ciclos de secagem e umedecimento podem estar associados a recuperação da estrutura do solo. Este efeito pode ser temporário e o IC tenderá a elevar-se com novos tráfegos, desde que a carga aplicada e umidade do solo favoreçam a compactação do solo. Já nos tratamentos sem tráfego, há uma aparente estabilização no tempo, dando indicações que o processo de

adensamento do solo já se definiu nesta condição. O preparo convencional até 08/89 demonstrou ser mais suscetível ao processo de adensamento natural. A Fig.6 mostra claramente que a partir da amostragem 12/89 os efeitos do tráfego se manifestaram de forma mais intensa, sugerindo que a atuação do preparo na resistência à penetração depende da magnitude das cargas aplicadas no solo. As interações entre preparo e data de coleta parecem ocorrer até 08/89, a partir daí as interações são entre tráfego e data de coleta.

Com relação ao efeito da resistência à penetração sobre o sistema radicular, há logicamente um aumento na restrição ao crescimento das raízes com o tempo. Se adotarmos um IC crítico de 2.0 MPa, como sugerido por alguns autores, pode se deduzir dos resultados que não ocorre paralização do crescimento radicular em superfície para esta condição de umidade no solo. No entanto, a taxa de crescimento radicular pode estar comprometida nestes valores de IC, resultando numa redução do volume de solo explorado pelo sistema radicular das culturas. A redução de produtividade pode ocorrer em condições de déficit hídrico prolongado.

PROFUNDIDADE DE 5-10 cm.

Para a profundidade de 5-10 cm os resultados de IC demonstram que o efeito do preparo foi também dissipado com o incremento dos efeitos do tráfego (Fig.8). Em 06/89 não houveram diferenças com relação ao tráfego, possivelmente

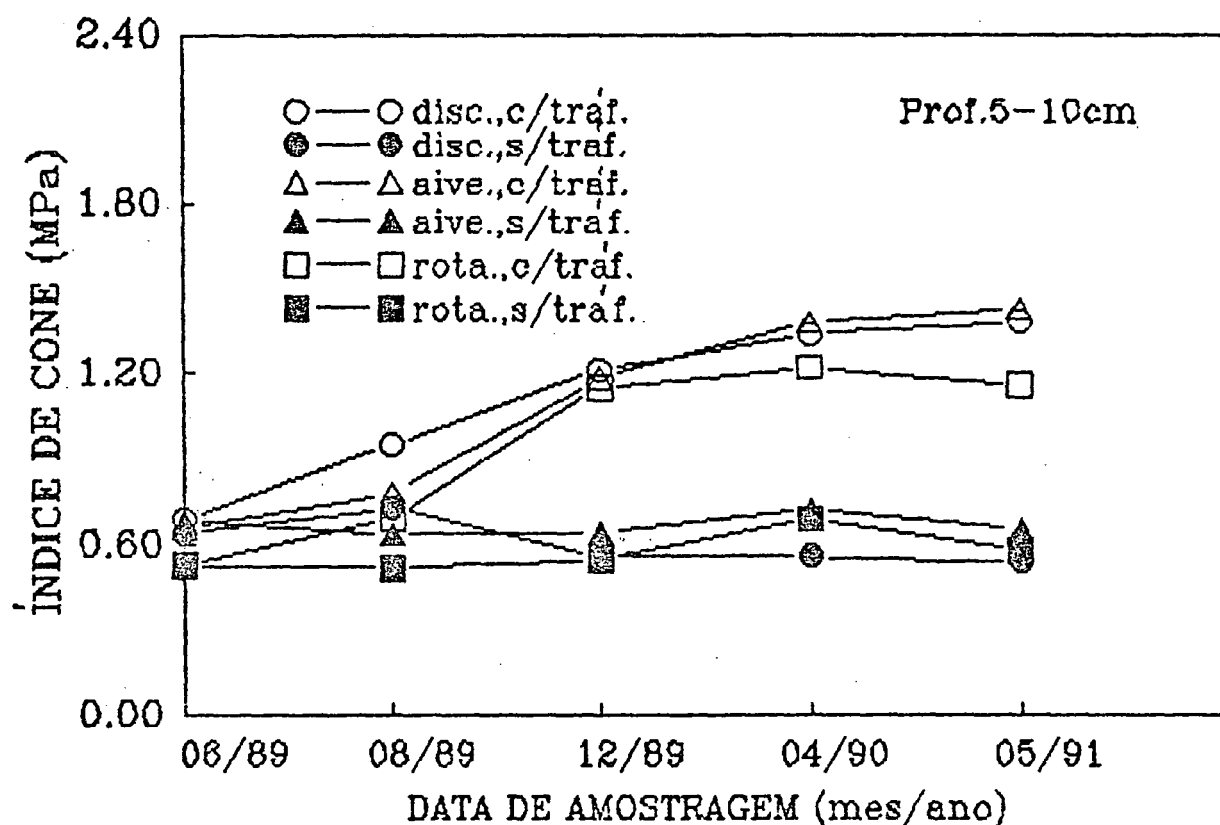


Fig.7. Variação do Índice de Cone na profundidade de 5-10 cm em função das épocas de amostragem.

devido as magnitudes de carga não serem suficientes para atingir esta profundidade. As diferenças ocorreram entre os métodos de preparo do solo. O IC do preparo com arado rotativo mostrou ser 22% e 26% menor do que para os preparos com arado de discos e alvecas, respectivamente. Os resultados foram semelhantes aqueles da área sem tráfego na profundidade 0-5cm, apesar das magnitudes serem diferentes. Para a amostragem realizada em 08/89, os resultados demonstraram que na área trafegada, o IC nos tratamentos com preparo convencional com discos foi significativamente

menor que nos preparos com alvecas e rotativo; já na área não trafegada não houve diferença entre os tratamentos.

Os resultados também demonstram que há um aumento na compactação do solo em subsuperfície com o aumento no número de passadas da máquinas e cargas aplicadas sobre o solo (Fig. 4 e 5), em concordância com os resultados de OHU e FOLORUNSO (1989). A variabilidade no IC também demonstrou ser maior na área trafegada. A calagem não teve efeito sobre o índice de cone.

A análise de variância tomando a data de coleta como um fator de variação mostrou uma interação positiva do tráfego com a data de coleta (quadro 1.5, anexo 1). Este resultado se justifica pelo aumento no número de passadas de pneu sobre o solo, assim como da carga aplicada. A Fig.7 mostra que sob a área trafegada há uma tendência generalizada do IC estabilizar no tempo, mais acentuadamente no preparo com arado rotativo. Na condição não trafegada, os resultados demonstram uma aparente estabilização a partir de 08/89, com uma maior variabilidade do IC no tratamento com arado rotativo.

PROFUNDIDADE DE 10-20cm

A análise da variância indicou diferenças entre os preparos na coleta realizada em 06/89. O preparo com arado rotativo reduziu de forma significativa o IC em relação aos preparos convencionais com arado de alvecas e discos, devido o solo ter sido mais intensamente mobilizado nesta profundidade. Na coleta realizada em 08/89 ocorreram

diferenças somente devido ao preparo do solo, com IC no preparo rotativo 22% menor do que nos preparos convencionais, face a intensidade de mobilização imposta ao solo por aquele método de preparo. Esta diferença estatisticamente significativa, com IC superior nos preparos convencionais está associada com a variabilidade nos resultados obtidos e ao critério de seleção dos dados que foi adotado. Isto também justifica o fato de que nesta profundidade não houveram diferenças entre os preparos, nas áreas com e sem tráfego na coleta realizada em 12/89. Nesta amostragem apenas ocorreram diferenças devido ao tráfego nos sistemas de preparo convencional, provavelmente um artifício

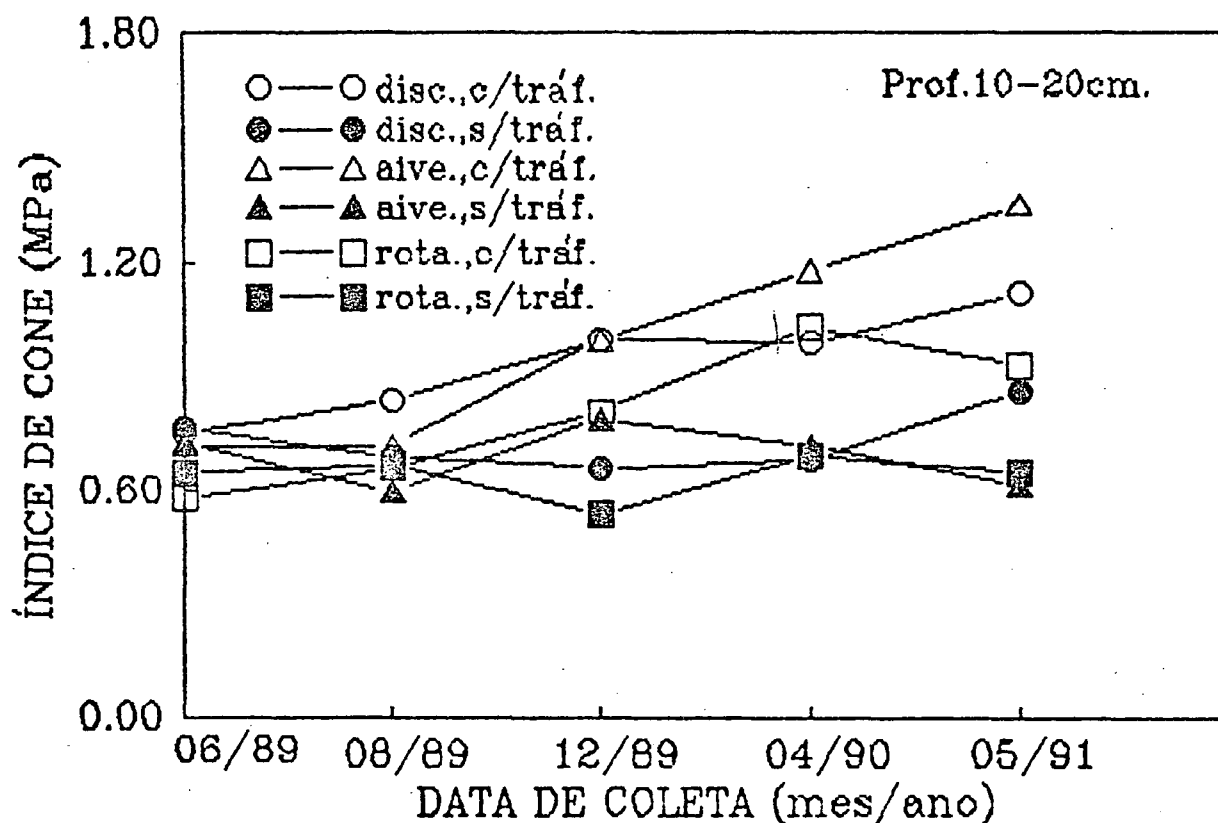


Fig.8. Variação do Índice de Cone na profundidade de 10-20 cm em função das épocas de amostragem.

associado a variabilidade dos resultados. A análise de variância demonstrou ocorre interação entre preparo, calagem e tráfego nesta profundidade, a partir da coleta de 12/89. Alguns fatores, tais como, desuniformidade na mistura do solo, atuação do sistema radicular associado com o tráfego podem estar promovendo uma interação complexa entre estes fatores. Há, contudo, uma tendência de aumento no IC em função do tráfego, nos preparos convencionais com arado de alvecas e discos e, uma redução no IC nas áreas não trafegadas nos preparos com discos e rotativo (Fig.8).

Para o período em que se procedeu a avaliação, pode-se, como tendência geral, prever que os efeitos do tráfego estão se intensificando nesta profundidade. Também os sistemas de preparo estão se comportando distintamente perante as cargas recebidas do tráfego. Há uma tendência do preparo com arado de alvecas sofrer mais os efeitos do tráfego.

PROFUNDIDADE DE 20-35cm

A comparação das médias revelou que os sistemas de preparo comportaram-se similarmente as profundidade anteriores. Nas duas amostragens iniciais o preparo com arado rotativo reduziu o IC em relação aos preparos convencionais com arado de discos e alvecas, respectivamente (Fig.3), discordando dos resultados obtidos por CASSEL (1980). Neste intervalo de amostragem podem existir ainda os efeitos do tráfego durante o preparo com arado de discos e os efeitos do revolvimento pelo equipamento de alvecas, mas que não foram detectados

pela metodologia empregada. Os efeitos de preparo e tráfego não se mostraram diferentes no decorrer do tempo, demonstrando a ausência dos efeitos destes na adensamento do solo.

A Fig.9 mostra uma tendência geral para um aumento na resistência do solo, provavelmente resultado de um processo de adensamento progressivo em função do peso das camadas superiores e da variação do potencial da água no solo. Os resultados também demonstram que os efeitos do tráfego não alteraram a resistência do solo nesta profundidade.

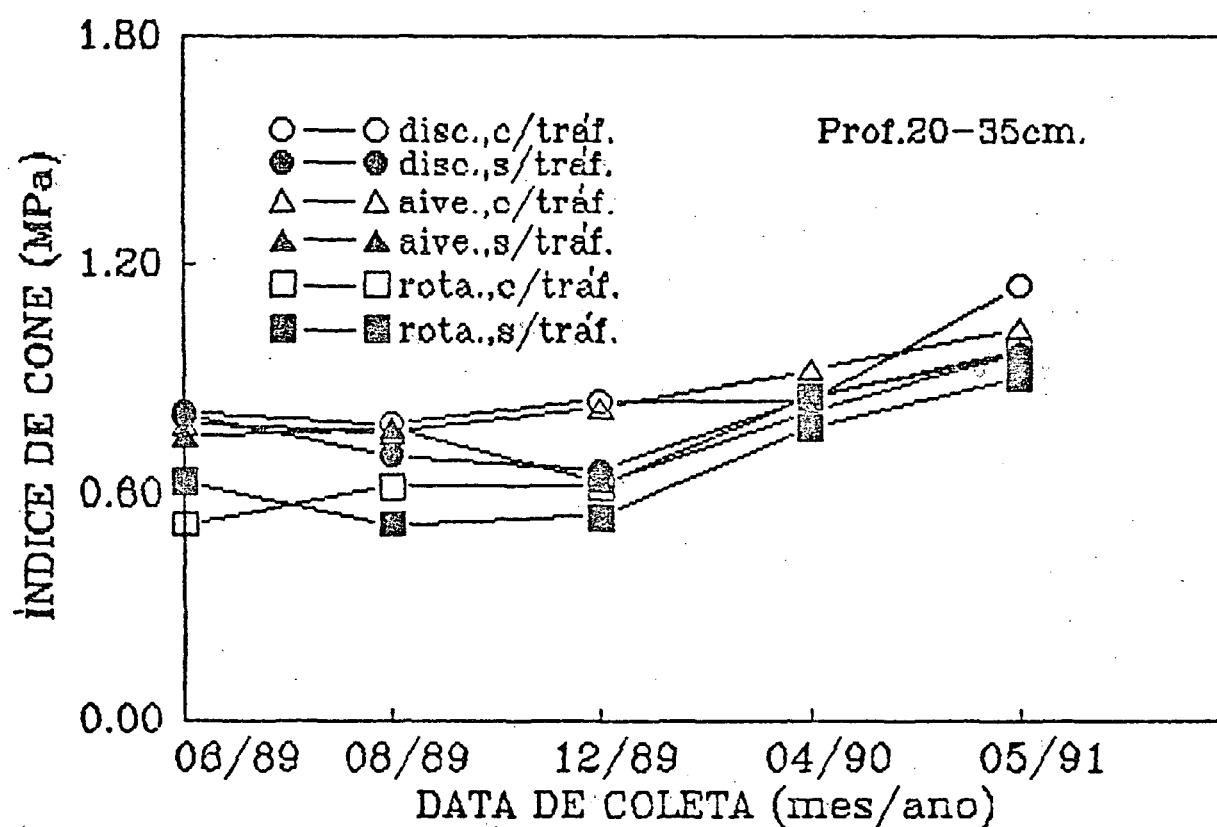


Fig.9.Variação do Índice de Cone na profundidade de 20-35 cm em função das épocas de amostragem.

PROFUNDIDADE DE 35-60 CM.

O IC mostrou um comportamento estatisticamente diferente entre os sistemas de preparo do solo, nesta profundidade (Fig.3,4,e 5). O teste de comparação das médias entre os preparos revelou que a mobilização imposta pelo arado rotativo a 60cm reduziu o IC e, demonstra que ainda não houve tempo suficiente para a recuperação da estrutura alterada por este método de preparo preparo. A variabilidade nos resultados é bastante grande, e pode ter mascarado as possíveis diferenças entre os tratamentos. Há uma tendência geral de um aumento do IC em função dos processos de adensamento do solo em profundidade (Fig.10).

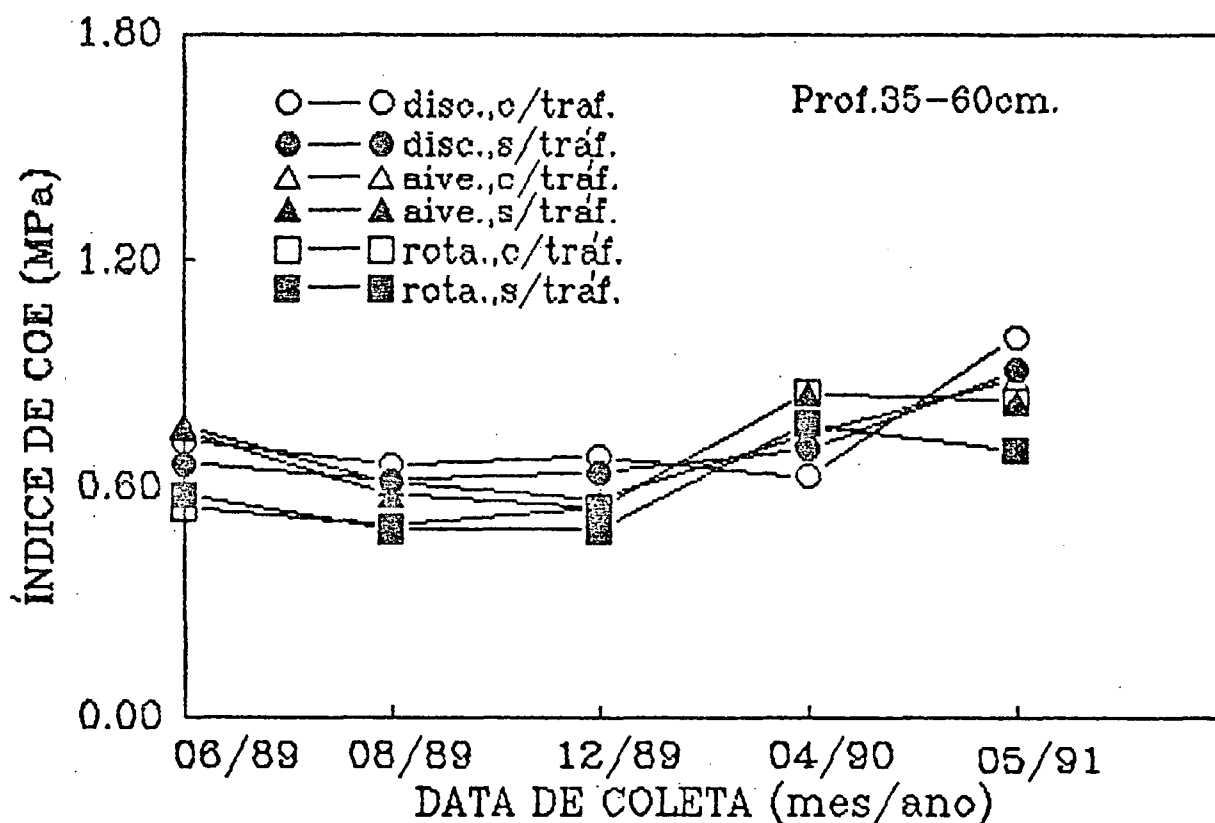


Fig.10.Variação do Índice de Cone na profundidade de 35-60 cm em função das épocas de amostragem.

4.DISCUSSÃO.

De maneira geral os resultados indicam que os efeitos do tráfego concentram-se nos primeiros 20 cm da superfície do solo, como também demonstrado por outros autores (ONOFIOK,1988; BAUDER et al.,1981). Os processos de adensamento do solo assumem maiores magnitudes em superfície, devido aos efeitos do tráfego. Também em superfície, é maior a quantidade e intensidade de ciclos de secagem e umedecimento, que são os mecanismos que determinam as modificações na resistência do solo devido as pressões negativas desenvolvidas pela água durante sua dessecação (NEARING et al.,1988, e NEARING e WEST 1988). NEARING et al.(1988) concluíram que o pré-stress de sucção de água no solo, por ocasião do seu dessecação, determina a quantidade de resistência que permanece no solo após seu reumedecimento. A ocorrência destes ciclos de secagem e umedecimento é mais provável e intensa na superfície do solo (VOORHEES,1983; VOORHEES e LINDSTROM,1983).Os resultados sugerem que, nas áreas sem tráfego a adensamento do solo deu-se por estes mecanismos. A provável presença de um grande volume de raízes dessecando o solo nas fases de máxima demanda hídrica das culturas intensificam estes processos. Além destes mecanismos, processos de tixotropia que ocorrem após a mobilização do solo tendem a estabilizar os agregados (KEMPER e ROSENAU,1984; UTOMO e DEXTER,1981), e contribuem para aumentar a resistência do solo. A ausência

ou a baixa intensidade dos ciclos de secagem e umidecimento abaixo da profundidade de 20 cm podem estar associados com a menor velocidade nos processos de adensamento do solo. Abaixo desta profundidade a estabilidade do solo e os mecanismos atuantes, poderiam ser melhor previstos a curto prazo associando o IC com outras propriedades de resistência do solo, e.g. a estabilidade de agregados, devido a alta variabilidade do IC medido a campo. No entanto, o IC mesmo assim demonstrou ser adequado para avaliar o adensamento do solo sob diferentes tratamentos de preparo e tráfego.

Os efeitos do tráfego resultam em um ambiente, em superfície, pouco apropriado para o desenvolvimento do sistema radicular das culturas de interesse comercial, e a tendência é de acentuar estes efeitos com o tempo.

Com relação ao impedimento do sistema radicular, os efeitos do tráfego evidentemente devem provocar reduções na taxa de crescimento das raízes. O aumento na resistência mecânica do solo deve reduzir o crescimento e a proporção de raízes que penetram no solo. O IC de 2.0 MPa considerado impeditivo ao crescimento das raízes da maioria das culturas não foi detectado no presente experimento nos dados corrigidos para o valor padrão de conteúdo de água no solo de 0.34 g/g. No entanto, existem indicações na literatura que IC entre 0.2 e 2.0 MPa já são detrimenais ao desenvolvimento radicular, como demonstrado por TAYLOR e BURNETT (1964; TAYLOR et al.(1966), TAYLOR e RATLIFF (1969a), COCKROFT et al.(1969), LOWRY et al.(1970); GERARD

et al.(1972); MIRREH e KETCHESON (1972); VOORHEES et al.(1975). O conteúdo de água no solo é dinâmico com o clima, e uma redução no conteúdo de água provocará um aumento na resistência do solo podendo exceder este valor de 2.0 MPa nas áreas trafegadas. A operacionalização das amostragens foi dificultada em condições de baixa umidade no solo.

No sistema de plantio direto, a cobertura morta reduz as perdas de água e, portanto, exercem um importante efeito na manutenção da resistência do solo em níveis que proporcionem um desenvolvimento satisfatório do sistema radicular por um maior período de tempo. Resultados mais conclusivos sobre os efeitos do preparo e tráfego poderão ser obtidos com mais amostragens no tempo, sobre a área experimental. De maneira geral, os resultados do experimento demonstram a necessidade de amostragens mais intensivas e detalhadas através da automatização dos métodos de amostragens.

5.CONCLUSÕES.

Os dados analisados permitem concluir que :

1. A resistência à penetração mostrou-se sensível as modificações impostas ao solo pelos processos de compactação e adensamento natural induzidos pelo tráfego e fatores climáticos, bem como na recuperação da estrutura do solo sob tráfego, nos primeiros 5cm. Nas entre-linhas sem tráfego, em superfície, ocorreu estabilização da resistência à

penetração no tempo, enquanto que na entre-linha trafegada a resistência aumentou até 20cm de profundidade;

2. Sob tráfego, os preparos convencionais mostraram-se mais suscetíveis à compactação enquanto que o preparo com arado rotativo reduziu o IC em praticamente todas as profundidades. Isto é provavelmente consequência do efeito de confinamento do perfil por camadas compactadas sub-superficialmente. A calagem não teve efeito significativo sobre o índice de cone.

3. Tomando da literatura o IC de 2.0 MPa, considerado impeditivo para o crescimento radicular da maioria das culturas, verificou-se que para este trabalho, num conteúdo padrão de água de 0.34g/g/, não ocorreram condições impeditivas ao crescimento de raízes no solo.

4. A calibração do IC para o conteúdo de água no solo possibilitou o tratamento estatístico dos dados obtidos.

5. Na ausência do tráfego, a redução do IC pelo revolvimento manteve-se no tempo. A reversão do IC para valores iguais ou maiores que os originais ocorreu apenas na entre-linha trafegada.

II. Porosidade do Solo.

1. REVISÃO DA LITERATURA.

O espaço entre as partículas sólidas do solo, ou porosidade do solo, é um componente importante em relação a movimentação de água e ar no solo e ao ambiente radicular. A porosidade do solo é definida como o volume de vazios em relação ao volume total do solo (MARSHALL e HOLMES, 1981), sendo mais comumente utilizada por cientistas do solo e agrônomos.

1.1. Determinação, classificação e função dos poros no solo.

O tamanho e a forma dos poros no solo tem ampla variação, desde alguns nanômetros de separação entre lâminas de argila que formam um quasi-cristal até alguns centímetros nas fissuras formadas durante a dessecação do solo, e orifícios resultantes da atividade da mesofauna do solo.

A determinação da variação ou distribuição de tamanhos de poros (DTP) é geralmente calculada utilizando o princípio da capilaridade, através da relação funcional entre o conteúdo de água e o potencial mátrico da água no solo, denominada curva de retenção de água (BAVER et al., 1972; MARSHALL E HOLMES, 1981; BOUMA, 1977). A DTP é uma característica importante na avaliação de sistemas de manejo sobre áreas de agricultura intensiva, principalmente a distribuição dos poros de maior diâmetro (BAVER et al., 1972).

A equação da capilaridade tem como limite superior os poros com diâmetro de aproximadamente 3mm (CHILDS, 1940;

HAMBLIN, 1985). Em poros maiores a interface água-ar não é mais controlada por forças da capilaridade de modo que a equação da capilaridade perde esta função para poros maiores do que aproximadamente 0.15-3.0mm (DEXTER, 1988). Considerações teóricas sobre os componentes e fatores que atuam na capilaridade podem ser obtidas em KIRKHAM e POWERS (1972) e MARSHALL e HOLMES (1981). O diâmetro mínimo para o qual a equação é sensível situa-se em torno de 0.001mm (MARSHALL e HOLMES, 1981). O volume de água removida de um dado volume de solo numa tensão específica representa o volume de poros drenados até o tamanho indicado por aquela tensão. Os diâmetros de poros assim determinados são expressos em diâmetro cilíndrico equivalente (DEXTER, 1988).

A utilização da equação da capilaridade gera alguns erros na estimativa da porosidade do solo. Entre estes, o fenômeno da histerese é considerado um dos mais importantes (BOUMA, 1977; MARSHALL e HOLMES, 1981). Também as alterações de volume do solo durante a sorção e dessorção de água deveriam ser estimadas, e poucos pesquisadores têm levado em conta este tipo de erro nas determinações da porosidade. As mudanças de volume do solo após a saturação podem estar relacionadas com a qualidade estrutural do solo resultante dos diferentes sistemas de preparo (HAMBLIN, 1982). De acordo com esta autora, pode-se estimar um erro associado, em proporção a mobilização imposta ao solo, dependendo da metodologia empregada para avaliar a porosidade do solo. Este erro depende também da época de amostragem após o

preparo, demonstrando assim a importância da variação temporal das propriedades físicas do solo.

A representatividade das amostras obtidas a campo com relação aos poros amostrados é discutível. Normalmente as amostras utilizadas em laboratório causam uma subestimação dos macroporos, devido a menor probabilidade destes ocorrerem em amostras de pequenas dimensões. Em função destas limitações o ideal seria determinar a curva de retenção "in situ" (LAL, 1979), e utilizá-la nestas estimativas. O uso de grandes amostras indeformadas em laboratório poderia ser uma alternativa para melhorar a precisão das estimativas. No entanto, pode ocorrer uma baixa reproducibilidade deste método em tensões menores que 6 kPa, em solos com grande volume de macroporos (KNEALE, 1985). De maneira geral, as diferenças entre propriedades hidráulicas determinadas a campo e em laboratório aumentam com o grau de deformação imposto as amostras utilizadas em laboratório (POWERS e SKIDMORE, 1984). Poros maiores que 0.005 mm, que são mais intensamente alterados pelo manejo, sofrem perturbações durante a coleta, transporte e preparo das amostras em laboratório (HAMBLIN, 1985). Modificações na CRA foram atribuídas à perturbação da estrutura em laboratório, com alterações na geometria dos poros interagregados (ERICK e TANNER, 1955, citados por Hamblin, 1985).

Os poros do solo são classificados de várias maneiras.

Eles são classificados em função (i) de seu diâmetro equivalente cilíndrico e funcionalidade (HAMBLIN, 1985), (ii) da capacidade de água e ar disponível (THOMASSON, 1978) e (iii) da posição em relação ao agregado (LOW, 1972). Também classificações com objetivos práticos, dividindo-os em macro, micro e mesoporos tem sido bastante utilizadas (DEXTER, 1988).

Macroporos são considerados os poros com diâmetro superior a 0.05mm ou o volume de poros drenados no potencial de -6.0 kPa (CARTER, 1988), apesar que BEVEN e GERMAN (1981) sugerem um diâmetro mínimo de 3mm para um macroporo. BEVEN e GERMAN (1982) definem macroporos como sendo poros com diâmetros suficientes para a ocorrência de fluxo canalizado em condições de não equilíbrio. No presente trabalho adotou-se o critério exposto em CARTER (1988). A diferença entre o volume total de poros, estimados a partir da relação entre a densidade do solo e densidade de partículas, e o volume de macroporos, é definido como volume de microporos. Os macroporos são funcionalmente classificados como poros de transmissão, importantes para o fluxo de água e ar no solo. Já os microporos tem como função principal a retenção de água, difusão de ar e nutrientes no solo. Nesta classificação, os microporos também englobam os mesoporos da classificação de DEXTER (1988). Outras classificações tem sido propostas e foram discutidas por HAMBLIN (1985), com diversos objetivos (QUADRO 1).

QUADRO 1. Tamanhos de poros e função no sistema solo-
água-plantas (HAMBLIN, 1985).

Diâmetro do Poro (Microns)	Importância no Solo
1500-50000	canais e ninhos de formigas
500-11000	galerias de minhocas
300-10000	raízes princ. de dicotil.
500-10000	raízes nodais de cereais
100-1000	raízes seminais de cereais
50-100	raízes laterais de cereais
20-50	raízes de prim. e seg. ordem
5-10	pelos radiculares
30	capacidade de campo (-10KPa)
0.5-2.0	Hifas fúngicas
0.2-2.0	bactérias
0.1	ponto de murcha permanente

A porosidade com ar, porosidade de aeração, ou capacidade de ar é outro parâmetro importante derivado da porosidade do solo (ERICKSON, 1982, VOMOCIL e FLOCKER, 1966). É determinada pela diferença entre a porosidade total e a porosidade com ar num potencial correspondente à capacidade de campo, a partir da CRA. A porosidade de aeração determinada num potencial de -6.0 kPa é bem correlacionada com medidas obtidas através de outros métodos (SWANSON e PETERSON, 1942).

A continuidade e ocorrência de macroporos estão estreitamente ligadas com a presença e atividade de minhocas e raízes, principalmente em solos onde os processos de fendilhamento ocorrem em baixa intensidade. Poros formados por minhocas compõem uma fração importante da macroporosidade do solo. Sob plantio direto, após 4 anos, os poros derivados da atividade de minhocas tiveram sua densidade e volume duplicados no horizonte Ap, em comparação com o plantio convencional (EHLERS, 1975). No plantio direto, a maioria dos poros tinham sua continuidade a partir da superfície e contribuíam para a transmissão de água até 1,80m de profundidade.

1.2. Fatores do Manejo e as Propriedades Físicas do

Solo.

A compactação é entendida como sendo uma resposta do solo à aplicação de cargas externas, implicando num aumento da densidade do solo e/ou decréscimo de volume (BRADFORD e GUPTA, 1986; HANKANSSON et al., 1988). Modificações na

densidade do solo significa alterações em outras propriedades físicas do solo. Na superfície dos solos cultivados a capacidade de retenção de água e o conteúdo de água disponível tendem a diminuir com o aumento da densidade do solo (REEVE et al., 1973), e a magnitude destes efeitos varia com a textura do solo.

No sistema de plantio direto, as operações de revolvimento do solo são eliminadas, e a ocorrência do tráfego resulta em uma camada compactada na superfície. Esta é caracterizada pela maior densidade e menor porosidade do solo (DERPSCH et al., 1987; GANTZER e BLAKE, 1978), apesar que os resultados de MACHADO e BRUM (1978) indicam também um aumento da densidade do solo sob preparo convencional em superfície, dependendo da época de amostragem. As primeiras entradas de máquinas no solo recém preparado são responsáveis por cerca de 75-90% da modificações na estrutura do solo (BLACKWELL et al., 1989).

O manejo utilizado pode afetar a densidade do solo (CASSEL, 1982; PIDGEON e SOANE, 1977), podendo eliminar os efeitos benéficos do preparo sobre outras propriedades físicas do solo (GULLEY et al., 1987). O tráfego associado à semeadura causa compactação na superfície, que persiste através de toda o período de crescimento da cultura (VOORHEES e LINDSTROM, 1983).

Vários parâmetros do solo podem ser utilizados para caracterizar o estado de compactação do solo, tais como a densidade do solo, porosidade total, distribuição de tamanho

de poros e resistência à penetração de um cone metálico no solo. A CRA é também um bom indicador dos efeitos da compactação sobre o solo, por refletir as alterações na distribuição dos tamanhos de poros. Em geral, com o aumento da compactação, a água retida em altos potenciais diminui enquanto que sob baixos potenciais aumenta (GUPTA e LARSON, 1982; GUPTA et al., 1988), além de diminuir o potencial no qual ocorre entrada de ar nos poros do solo.

A compactação do solo devido a grandes cargas por eixo, reduz a drenagem interna do solo, mantendo-o por mais tempo com conteúdo de água favorável à compactação (VOORHEES e LINDSTROM, 1983; GUPTA e ALLMARAS, 1987). A redução na infiltrabilidade do solo é um índice da redução no diâmetro dos poros (VOORHEES et al., 1978; VOORHEES, 1983). Este problema ocorre principalmente após a colheita, onde as cargas por eixo são máximas.

O efeito primário da compactação é uma alteração nas propriedades físicas do solo (VOORHEES, 1979). Em geral, a compactação excessiva do solo pelo tráfego de máquinas aumenta a densidade do solo, reduzindo a porosidade total e macroporos no solo (KAYOMBO e LAL, 1986; ONOFIOK, 1988; PIKUL Jr. e ALLMARAS, 1986; CARTER, 1990), com reflexos no movimento de água e ar no solo (UNGER, et 1981). O efeito da compactação sobre a porosidade e densidade é via de regra maior na superfície do solo (VOORHEES et al., 1978; ALLMARAS et al., 1982), com alteração nos vários grupos de tamanhos de poros (HANKANSSON et al., 1988), além de perdas na

continuidade de poros de tamanho médio (DEXTER,1988). O valor máximo de densidade do solo e sua profundidade de ocorrência dependem da carga aplicada e umidade por ocasião do tráfego (GAMEDA et al.,1987; MEECK et al.,1988).

A ação de ciclos de secagem e umedecimento, e o impacto da gota de chuva, também podem provocar a redução da porosidade total na superfície do solo (HAMBLIN,1982). Processos de contração e expansão afetam principalmente os microporos (NEWMAN e THOMASSON,1978), enquanto que o cultivo e a compactação afetam principalmente os macroporos (CURRIE,1984). No sistema de plantio direto, a cobertura do solo minimiza tanto o impacto da gota com o solo como a intensidade e ocorrência dos ciclos de secagem e umedecimento. Os sistemas de preparo com mínima mobilização do solo, com menor diluição da matéria orgânica no perfil, apresentam maior estabilidade estrutural em superfície, e conseqüentemente suportam mais os efeitos dos vários tipos de forças aplicadas (HAMBLIN,1982).

Os macroporos são bastante sensíveis às cargas aplicadas no solo, e são destruídos nos primeiros estágios da compactação (GUPTA et al.,1988). Assim, a macroporosidade caracteriza bem os efeitos da compactação sobre a estrutura do solo (CARTER,1990). Observações em plantio direto e convencional indicam uma redução de 50% na macroporosidade em plantio direto (SHIPITALO e PROTZ,1987). Tais poros são importantes para as trocas gasosas e condutividade hidráulica

ca saturada do solo (VOMOCIL E FLOCKER, 1966), além de representarem o espaço poroso mais facilmente disponível para raízes e organismos do solo. A presença de grandes canais (0.1-1.0mm) em solos não revolvidos, são os prováveis caminhos de transmissão da água no solo (CLOTHIER e WHITE, 1981). A infiltração pode ser aumentada por um grande número de macroporos no solo. O bloqueio destes poros pode ocorrer em função do impacto da gota de chuva no solo e da instabilidade dos agregados (EDWARDS et al., 1979), com decréscimo na quantidade de água infiltrada. Macroporos artificialmente criados foram mais resistentes à cargas aplicadas paralelamente ao eixo dos canais (BLACKWELL et al., 1990). Durante chuvas intensas, a presença de macroporos verticalmente contínuos pode desviar o fluxo de água através de suas paredes (BEVEN e GERMAN, 1982), independente da matriz do solo estar saturada. O plantio direto favorecendo o desenvolvimento e a persistência dos macroporos no solo, possibilita que a água seja distribuída em maiores profundidades por este mecanismo.

A habilidade do sistema poroso em conduzir água no solo também pode ser impedido por processos de destruição dos agregados do solo pelo rápido umedecimento destes na superfície (LYNCH e BRAGG, 1985). Este processo causa a destruição dos agregados maiores, e os poros entre eles tornam-se incapazes de transmitir água no solo. Adicionalmente, a argila dispersa pode produzir uma baixa taxa de infiltração de água no solo (SHANMUGANTHAN e

OADES,1982). A estabilidade do sistema poroso depende, a longo prazo, da quantidade e tipo de constituintes agregantes adicionados ao solo pelas diferentes culturas (OADES,1984; ANGERS et al.,1987; REID e GOSS,1981). As gramíneas possuem um sistema radicular fino, denso e volumoso, contribuindo com a agregação do solo (LINCH e BRAGG,1985), com o conseqüente aumento na porosidade interagregado. Esta pode persistir no solo sob cargas aplicadas de até 0.5 MPa (ANGERS et al.,1987; GUPTA e LARSON,1982). A compactação do solo e a degradação da estrutura pelo tráfego, sob plantio direto, podem explicar parcialmente as possíveis reduções nas produtividades das culturas neste sistema, em solos argilosos (LAL et al.,1989).

O preparo é um processo dinâmico que causa mudanças pronunciadas nas características físicas do solo (FERNANDES et al.,1983), as quais persistem no tempo, dependendo do clima e tipo de solo. O solo preparado com diferentes implementos resulta em diferentes qualidades estruturais em função da intensidade e grau de mobilização imposta (SHAFFER e JOHNSON,1982; BOONE,1988), e do conteúdo de água por ocasião do preparo (OJENIYI e DEXTER,1979). O método de preparo pode afetar a estrutura do solo dependendo também da profundidade de trabalho (DOMZAL e SLOWSKA-JURKIEVICZ,1989). As mudanças na densidade do solo na camada arável são controladas pelo tempo decorrido após o preparo, tipo de preparo secundário, tráfego e clima (MIELKE et al.,1986,

FERNANDES e GALLOWAY,1980). Avaliando as modificações impostas pelo preparo, UNGER (1975) demonstrou que a diferença na retenção de água entre amostras deformadas e indeformadas equivale aos efeitos do preparo do solo. O preparo do solo pode recriar macroporos no solo, no entanto estes são frequentemente transitórios, e podem ser destruídos pelo impacto da gota de chuva no solo, pela compressão do solo pela raiz e por ciclos de secagem e umedecimento (HAMBLIN e TENNANT,1981), além da compactação do solo pelo tráfego de máquinas. Os efeitos de métodos específicos de preparo sobre as propriedades físicas do solo podem ser facilmente eliminadas pelo tráfego de máquinas (VOORHEES e LINDSTRON,1983).

Pode haver contradições entre os resultados obtidos sobre os efeitos do preparo sobre a porosidade e retenção de água no solo. Na comparação de plantio direto com plantio convencional, alguns estudos demonstram uma redução no volume de macroporos em superfície nos solos sem preparo, apesar de que em subsuperfície os volumes dos vários tamanhos de poros são equivalentes (DOUGLAS et al.,1980). A presença de minhocas e outros organismos em solos sob plantio direto origina a formação de grande número de canais, compensando as reduções impostas pelo tráfego (BARNES e ELLIS,1979; EHLERS,1975; LAL,1976). No plantio direto os resíduos em superfície produzem um ambiente que permite a multiplicação e atividade das minhocas no solo (LEE,1985). Assim a comparação de resultados entre plantio

direto e convencional, deveria ser feito considerando condições semelhantes de manejo, em épocas semelhantes (HAMBLIN, 1985), isto porque mudanças estruturais significantes podem ocorrer no solo dentro de pouco tempo (HAMBLIN, 1982). Mudanças na macroestrutura com a chuva podem ocorrer logo após o preparo. Estas representam uma espécie de erosão interna, com o material desagregado unindo as partículas e/ou agregados nos seus pontos de contato (DEXTER, 1983). Modificações no plantio direto ocorrem dentro de um ou dois anos, e um aumento na proporção de macroporos depende do nível de atividade biológica do solo (EHLERS, 1975).

Com relação aos efeitos do preparo profundo sobre a porosidade do solo, são poucos os resultados quantitativos disponíveis. Como regra geral, o preparo profundo em solos compactados poderá resultar em maior porosidade no subsolo (UNGER, 1979), apesar que a superposição de diferentes sistemas de preparo sobre estes solos pode promover a reversão destas condições (NEGI et al., 1982). As diferentes espécies de culturas podem interagir com o solo para formar diferentes tamanhos de poros em função da morfologia do sistema radicular. A sequência de culturas poderá trazer resultados muito distintos. Um sistema em monocultura pode resultar em menor estabilidade dos agregados e menores valores de conteúdo de água para todos os potenciais de água no solo, principalmente na faixa de macroporos (FAHAD et al., 1982). Solos com dificuldade de formação e estabilização

da estrutura possuem elevada susceptibilidade à redução no volume total dos macroporos (HAMBLIN E DAVIES, 1977).

A capacidade dos solos em reter água é um dos aspectos de interesse na agricultura não irrigada. O conteúdo volumétrico de água é maior sob plantio direto, e este maior armazenamento de água pode ser devido ao melhor arranjo e DTP, além da cobertura do solo pelos resíduos, que reduzem a evaporação do solo (GANTZER e BLAKE, 1978). Resultados contrários podem ser obtidos devido a variação temporal das propriedades físicas do solo (ZHAI et al., 1990). A reduzida taxa de evaporação devido a cobertura em plantio direto, pode diminuir a quantidade de ciclos de secagem e umedecimento, e assim diminuir a variabilidade temporal dos parâmetros estruturais do solo (ZHAI et al., 1990).

Após cessar o efeito das forças gravitacionais e iniciar a atuação das forças capilares, a quantidade máxima de água que um solo pode reter é arbitrariamente denominada Capacidade de Campo (CC). Para propósitos práticos a CC corresponde ao conteúdo de água em um potencial de -6.0 kPa. Alguns também utilizam o conteúdo de água retida em potenciais de -10 kPa ou ainda -33 kPa (DEXTER, 1988). No potencial de -6.0 kPa a água ocupa todos os poros com tamanho menor que 0.05 mm, enquanto que os poros acima deste tamanho estão ocupados com ar. O Ponto de Murcha Permanente (PMP) diz respeito ao conteúdo de água na tensão de 1500 kPa, determinada na CRA. O conceito de água disponível, entre a CC e o PMP, é arbitrário e genérico, e

sua utilização tem sido feita levando em conta a praticidade de sua determinação, principalmente para irrigação. A fração de água disponível no solo é variável com a dinâmica da transpiração (DENMEAD e SHAW, 1962), assim como o potencial da água no solo no PMP como demonstrado por GARDNER (1960). O conceito de água disponível deveria então, levar em conta o tipo de solo, planta e as condições climáticas no ambiente em questão.

1.3. Importância Agronômica dos Poros no Solo.

O movimento de água e oxigênio, assim como de raízes e organismos no solo, realiza-se nos vazios do solo. O diâmetro e continuidade dos macroporos são de extrema importância para as raízes, uma vez que as práticas agrícolas geralmente destroem a continuidade dos poros. Bactérias com dimensões de aproximadamente 2 μ m poderão ser excluídas de cerca de 75% da porosidade do solo, e a matéria orgânica ali retida estaria protegida do ataque microbiano (AYLMORE e QUIRK, 1967).

A redução na proporção dos macroporos na superfície dos solos cultivados pode significar grandes reduções na condutividade hidráulica saturada do solo em baixos potenciais (ALLMARAS et al., 1982). Além disso, períodos mais prolongados com excesso de água podem gerar condições de anaerobiose, significando maiores perdas de nitrogênio e diminuindo a atividade biológica do solo, com consequentes impactos sobre o ambiente radicular.

A aeração do solo é um parâmetro agronomicamente importante. Sob condições compactadas ocorre uma redução no número de sítios com adequada aeração (CURRIE, 1984). Um déficit de O_2 no ambiente radicular é frequentemente quantificado por uma reduzida difusão de oxigênio no solo, a qual aproxima-se de zero quando a porosidade de aeração é menor que $0.10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, na capacidade de campo (DANIELSON e SUTHERLAND, 1986; GUPTA e LARSON, 1982; HILLEL, 1980b; GRABLE e SIEMER, 1966; DEXTER, 1988; VOMOCIL e FLOCKER, 1961). A porosidade de aeração limitante depende também do tipo de planta e nível de atividade microbiana no solo (GUPTA e ALLMARAS, 1988).

Porosidade de aeração entre 0.10 e $0.13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ pode ser adequada para permeabilidade do solo, mas insuficiente para um nível adequado de aeração sob condições de umidade elevada (CARTER, 1990). O fornecimento de O_2 às raízes depende de fatores complexos incluindo tortuosidade, continuidade e distância entre poros ocupados com ar (DEXTER, 1988). Em solos severamente compactados, a aeração insuficiente é um dos fatores que limitam o crescimento radicular sob condições de umidade elevada (BOONE et al., 1986). O acúmulo de raízes na superfície ocupa parte do espaço poroso do solo, e assim pode contribuir para redução da taxa de difusão de oxigênio no solo (ASADY e SMUCKER, 1989). Um certo grau de compactação, por outro lado, pode ser benéfico às plantas, devido a melhor eficiência no uso da água (GARCIA et al., 1988; SIDIRAS e VIEIRA, 1984).

A presença de macroporos contínuos tem chamado atenção em solos sob plantio direto. Estes poros originados especialmente da atividade de minhocas no solo, tem grande importância hidrológica (BEVEN e GERMAN, 1982), face sua continuidade (EHLERS, 1975; BOUMA et al., 1982) e persistência (BARNES e ELLIS, 1979). A presença de macroporos oriundos da atividade da mesofauna do solo tem sido considerado um fator de melhoria do solo sob plantio direto (HAMBLIN, 1985). Uma boa distribuição de raízes requer a presença de macroporos contínuos no solo.

As raízes das culturas também contribuem para a presença e persistência dos canais por elas criados no solo, e raízes de culturas subsequentes crescer nos canais oriundos de raízes da cultura anterior (EHLERS et al., 1983). A quantidade de raízes criando poros no solo excede o diâmetro total dos poros oriundos da atividade de organismos, sendo portanto de maior importância relativa (BARLEY, 1963, citado por HAMBLIN, 1985). O autor ainda argumenta que o maior diâmetro dos canais criados por minhocas têm um papel reduzido no movimento de água no solo pela dificuldade de ter seu volume totalmente preenchido com água em condições de saturação.

Os canais de raízes podem aumentar a condutividade hidráulica entre potenciais de -0.3 e -6.0 kPa, num diâmetro de poros entre 0.1 e 0.005mm, respectivamente. Em sistemas de cultivo intensivo, no entanto, ocorre a interrupção na continuidade e bloqueio da abertura destes canais, de modo

que estes efeitos sobre a condutividade não são encontrados. Já no caso das pastagens e sistemas de plantio direto, os canais oriundos do sistema radicular tem efeito mais significativo sobre a condutividade. No entanto, muitos estudos comparativos entre solos preparados e não preparados, não sustentam esta hipótese, visto que outros fatores mascaram os efeitos das raízes, como a grande atividade de minhocas no plantio direto.

Uma menor proporção de macroporos refletem um movimento mais lento de água através da superfície do solo (HAMBLIN e TENNANT, 1981). A taxa média de infiltração aumenta com a presença de macroporos oriundos da atividade de minhocas no solo (ZACHMAN et al., 1990).

As fissuras originadas do processo de contração do solo pela dessorção de água, dão origem a macroporos, principalmente em solos com material argiloso expansivo (HAMBLIN, 1985). Em Vertissolos estas fissuras podem atingir até 1.0m de profundidade (WARKENTIN, 1982, citado por HAMBLIN, 1985). Nos solos tropicais, com elevado conteúdo de óxidos e argilas do tipo 1:1, o processo de contração e os mecanismos responsáveis são muito pouco estudados, apesar de serem importantes para as propriedades físicas do solo. Certamente nestas condições, apesar destes processos ocorrerem menos intensamente, as raízes e organismos do solo se beneficiarão.

No plantio direto as propriedades físicas do solo tendem a alcançar um estado de equilíbrio após alguns anos

de implantação (BOONE, 1988). As vantagens econômicas do sistema de plantio direto apontam para a probabilidade de que em um futuro próximo, as culturas deverão explorar um solo mais denso. Assim, os limites de compactação para as culturas devem ser conhecidos, levando em conta os aspectos tecnológicos regionais e os tipos de solos envolvidos. A provável limitação no potencial produtivo do solo em plantio direto aponta para a necessidade de trabalhos de pesquisa, visando entender os mecanismos envolvidos nestes processos.

2. MATERIAIS e MÉTODOS.

Os tópicos referentes a Localização do Experimento e Caracterização do Solo, Tratamentos Utilizados, Sistema de Cultivo e Manejo das Culturas, Desenho Experimental e Análise Estatística foram descritos na primeira parte deste trabalho.

2.1. Coleta de Amostras Indeformadas.

Antes da instalação do experimento, com objetivo de caracterizar a influência do manejo anterior e sua persistência após a aplicação dos tratamentos, foram retiradas amostras de solo com estrutura indeformada. Foram amostradas as profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-35 e 35-60cm. A área experimental foi dividida em três partes considerando a futura instalação dos blocos de tratamentos. Em cada parte foram amostrados três pontos numa transeção diagonal a área, cujas amostras foram submetidas às determinações descritas mais adiante.

As coletas de amostras indeformadas após a implantação do experimento foram realizadas após os tráfegos de colheitas, ocorridos durante a colheita das culturas do milho (04/90) e soja (05/91), respectivamente. Foram amostradas as linhas com e sem tráfego de cada tratamento, por introdução lenta de um anel volumétrico, com macaco hidráulico, utilizando um veículo leve como contra-peso. Para facilitar a retirada das amostras e perturbar o mínimo possível a parcela experimental, uma pequena trincheira (30x30cm) foi sendo gradativamente aberta, de acordo com a profundidade amostrada. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas sob temperatura máxima de 50C, para minimizar a atividade biológica e perda água das amostras, até serem processadas.

A partir de observações sobre resultados preliminares da primeira amostragem, onde não foi verificado efeito da calagem sobre os parâmetros determinados, decidiu-se realizar a segunda coleta de amostras indeformadas da seguinte maneira:

- a) nos tratamentos com calagem foram retiradas amostras em todas as profundidades, nas entre-linhas com e sem tráfego.
- b) nos tratamentos sem calagem retirou-se amostras nas entre-linhas com tráfego, nos preparos com arado de discos e alvecas. O tratamento de preparo com arado rotativo não foi amostrado. A maior importância prática dos preparos com arado de alvecas e discos, bem como o tempo hábil para o

processamento das amostras e a continuidade do experimento, foram levados em conta na tomada desta decisão.

2.2. Curva de Retenção de Água no Solo.

As amostras foram inicialmente saturadas sob extração de ar à vácuo por duas horas, e posteriormente mantidas por 12 horas num recipiente com lâmina de água cobrindo 2/3 das amostras, garantindo a maior saturação possível. Em seguida as amostras foram submetidas aos potenciais de -1, -2, -4 e -6 KPa em uma mesa de tensão adaptada de KHIEL (1979). Os potenciais de -10, -33, -50, -100, -300, -500 kPa foram aplicados às amostras em membranas porosas na câmara de pressão de Richards (KLUTE, 1986). Após a aplicação da máxima pressão às amostras, foi determinado o peso seco do solo em estufa a 105-110°C (EMBRAPA, 1979). As determinações da porosidade e retenção de água no solo foram feitas à partir dos resultados obtidos destas determinações.

2.3. Densidade do Solo e de Partículas.

A densidade de partículas foi determinada através do uso de balão volumétrico e álcool etílico (EMBRAPA, 1979). A densidade do solo foi determinada pela relação entre massa de solo seco a 105-110°C e o volume da amostra (BLAKE e HARGE, 1986).

2.4. Porosidade do solo.

A porosidade total foi obtida a partir da relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas (SUTHERLAND e DANIELSON, 1986), de acordo com a equação (1), a seguir:

$$(1) P_t = 1 - d_s/d_p,$$

onde P_t é porosidade total, d_s é a densidade do solo, e d_p a densidade das partículas.

A microporosidade foi obtida através da umidade retida na tensão de 6 kPa, conforme a equação (2) abaixo:

$$(2) M_{ic} = U_{0.6kPa},$$

onde M_{ic} é a microporosidade e, $U_{0.6kPa}$ é a umidade retida na tensão de 6 kPa.

A macroporosidade ou porosidade de aeração, a rigor considerado como o volume de poros com ar na capacidade de campo, foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a quantidade de água por unidade de volume de solo retida na tensão de 6 kPa.

$$(3) P_{Oar} = P_t - M_{ic},$$

onde P_{Oar} é a porosidade de aeração.

2.5. Conteúdo de Água Disponível.

O conteúdo de água disponível foi determinado pela diferença do conteúdo de água entre os potenciais de -6,0 e -100 kPa, neste trabalho denominada "conteúdo de água prontamente disponível".

$$(4) CAPD = U_{0.6kPa} - U_{100kPa}$$

A água retida a baixas tensões possibilita quantificar as alterações da estrutura do solo decorrentes dos fatores de manejo, os quais alteram a fração dos maiores poros do solo. Os resultados obtidos foram utilizados na análise estatística utilizando o programa estatístico SYSTAT (WILKINSON, 1987).

3.RESULTADOS

3.1.Estado anterior

Foi realizado, a partir da coleta pré-implantação a determinação da densidade do solo, porosidade e retenção de água no solo. A caracterização da área experimental foi apresentada na primeira parte deste trabalho.

O preparo do solo utilizado antes da implantação dos tratamentos era o convencional com o provável uso de grade pesada. Os maiores valores de densidade do solo até 20cm (Fig 1) demonstram os efeitos deste sistema de preparo. O tráfego de máquinas e o adensamento natural do solo associado com o pouso de aproximadamente seis meses em que a área permaneceu, são os fatores responsáveis pelos maiores valores da densidade do solo até 20cm. Os fatores que contribuíram para aumento da densidade do solo em superfície também atuaram na redução do volume de poros totais e da porosidade de aeração (Fig.1), cujos valores ficaram abaixo do mínimo exigido de $0.10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ usualmente citado pela literatura. O valor mínimo de porosidade de aeração, estimada num potencial de -6 KPa foi de $0.07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, na profundidade de 0-5cm.

A curva de retenção de água no solo (Fig.1B), mostra que sob baixos potenciais, o menor volume de água retida ocorreu nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20cm, em correspondência com os menores valores de porosidade total obtido nestas profundidades. O conteúdo de água disponí-

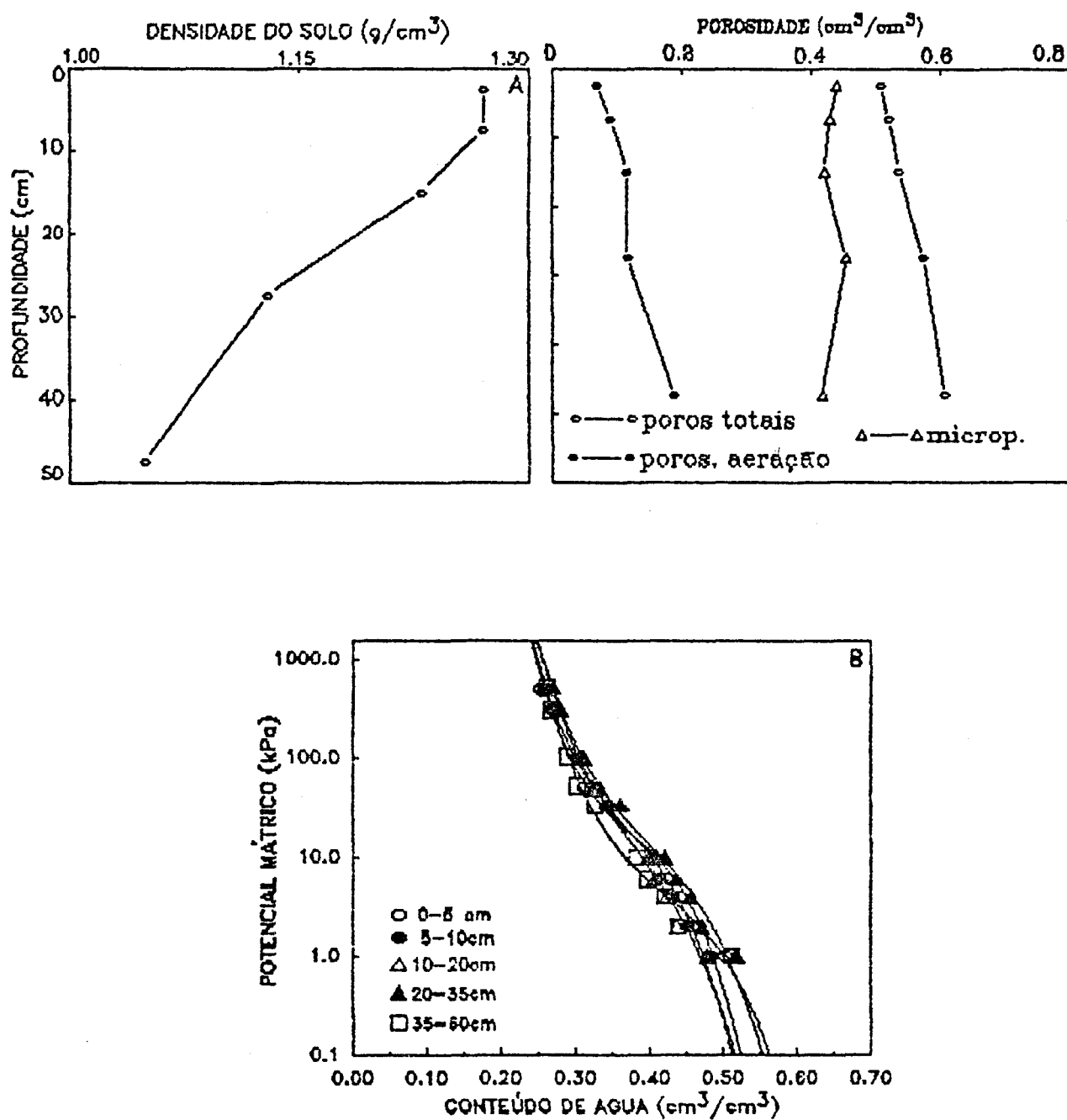


FIG.1. Caracterização da densidade do solo (A), curva de retenção de água no solo (B) e porosidade do solo (C) antes da implantação do experimento.

vel determinado entre os potenciais de -6 e -100 KPa foi de 0.12, 0.11, 0.10, 0.12 e 0.11 cm³/cm³ nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-35 e 35-60cm, respectivamente. A compactação em superfície pode contribuir com o desenvolvimento superficial do sistema radicular das culturas, explorando um menor volume de solo, e consequentemente utilizando ineficientemente água e nutrientes, bem como aumentando a suscetibilidade à ocorrência de veranicos. A eliminação de camadas compactadas, entre outros impedimentos, é um requisito fundamental para a introdução do sistema de plantio direto.

3.2. Resultados pós-implantação.

3.2.1. Densidade do solo.

As amostragens para determinação da densidade do solo e consequentemente porosidade e retenção de água foram realizadas após o tráfego de colheitadeiras, contemplando o efeito de cargas máximas sobre o solo. A análise de variância da coleta realizada em 04/90 (Quadro 11.1, anexo 11) demonstrou efeitos do tráfego até a profundidade de 35cm, e efeitos de preparos na profundidade de 35-60cm. A profundidade dos efeitos da compactação no solo depende do conteúdo de água do solo por ocasião do tráfego, e este não foi determinado. A calagem não teve efeito estatisticamente significativo sobre a densidade do solo. O tráfego aumentou a densidade do solo até a profundidade de 35cm (Fig.2),

porém com magnitudes bem inferiores àquelas das profundidades mais superficiais. O efeito do tráfego no aumento da densidade do solo também tem sido demonstrado por outros autores (VOORHEES e LINDSTROM, 1983), principalmente em superfície. Na profundidade de 20-35cm, o efeito significativo do tráfego sobre o preparo com arado rotativo a 60cm de profundidade pode ser atribuído a ausência do confinamento do perfil, devido a remoção da compactação de subsuperfície. Assim uma parte importante das cargas aplicadas foram distribuídas mais profundamente. As curvas de transmissão de cargas no solo pelos pneus agrícolas, conforme a profundidade, terão formato elíptico ou circular (GUPTA et al. 1985), e quanto mais largo mais profundamente a carga é transmitida no solo. É possível que a presença de camadas compactadas no interior do perfil tenha influência na transmissão das cargas no solo.

Os possíveis efeitos do preparo do solo até 35cm foram eliminados pelo tráfego, devido as magnitudes de cargas aplicadas pelas colheitadeiras, como sugerido por VOORHEES e LINDSTROM (1983), cujos resultados demonstraram que não houve efeito do preparo após a ocorrência do tráfego. Na área não trafegada o comportamento da densidade foi mais homogêneo, comparado a área trafegada.

Na profundidade de 35-60cm, o preparo com arado rotativo apresentou maior densidade do solo que os preparos convencionais com arado de discos e alvecas, os quais não diferiram entre si. Este comportamento está provavelmente

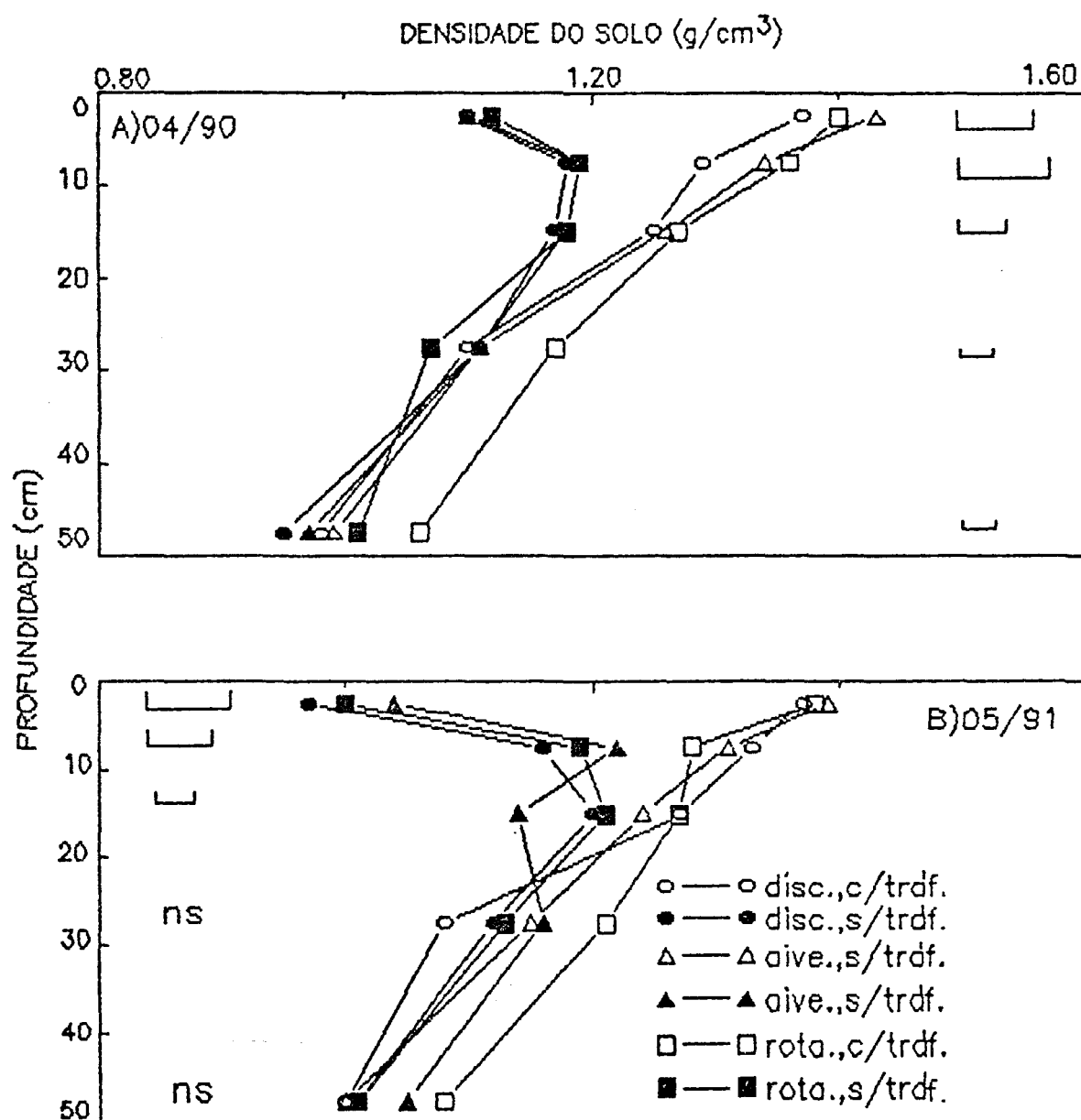


Fig.2.Densidade do solo determinada nas coletas 04/9 (A) e 5/91 (B) para os tratamentos de preparo com e sem tráfego.

associado com a atuação do preparo profundo, mobilizando a estrutura do solo, mecanicamente mais fraca nesta profundidade.

Na coleta realizada em 05/91, a análise de variância demonstrou efeitos do tráfego até a profundidade de 20cm, e abaixo desta nenhum efeito dos tratamentos. Os efeitos do tráfego concentram-se em superfície.

A ausência de efeitos do tráfego e do preparo nas profundidades de 20-35 e 35-60cm (Fig.28) pode estar associada com a variabilidade dos resultados, determinados pela variabilidade própria da estrutura do solo, e com a dificuldade do método de amostragem em representar adequadamente os efeitos dos tratamentos. Assim, nesta última amostragem, as diferenças foram relativas ao tráfego, concentradas na superfície do solo até 20cm. Os tratamentos de preparo convencional sem calagem e com tráfego não foram diferentes entre si. As densidades médias foram de 1.34, 1.37 e 1.26 para as profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20cm, nestes tratamentos de preparo. A ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os métodos de preparo, na área sem tráfego, em superfície, pode ser indicação de um adensamento natural homogêneo sobre diferentes graus e intensidade de mobilização do solo. Estes efeitos podem ser atribuídos aos ciclos de secagem e umedecimento, intensificados com a demanda hídrica das culturas. Também a homogeneização imposta pelo sistema radicular das culturas

pode ter contribuído para a homogeneização do solo em superfície.

Na comparação entre as amostragens, a análise de variância demonstrou diferenças significativas entre as coletas na profundidade de 0-5cm. Na área trafegada obteve-se uma redução média de 3% na densidade do solo, enquanto que na área não trafegada esta redução foi de 10%, na amostragem realizada em 05/91 (comparar as figs.2A e 2B), sendo sensivelmente maior no preparo convencional com arado de discos. Estes resultados refletem a atuação do sistema radicular das culturas na recuperação da estrutura do solo. A maior densidade do solo na área trafegada, persistiu ainda após o tráfego da colheitadeira na cultura da soja, indicando a grande magnitude de seus efeitos sobre a compactação do solo. A maior redução da densidade do solo na área não trafegada é devido a menor resistência à penetração, resultando em maior volume de raízes nesta área.

3.2.2.POROSIDADE DO SOLO

A análise de variância dos resultados obtidos nas duas amostragens realizadas (Quadro 11.2, anexo 11) demonstram os efeitos dos tratamentos sobre os parâmetros avaliados. As análises foram realizadas comparando os tratamentos por profundidade amostrada, com objetivo de facilitar a interpretação dos resultados, e detalhar os efeitos dos tratamentos em profundidade.

A calagem não teve efeito estatisticamente significativo sobre a porosidade do solo, em nenhuma das profundidades amostradas.

Profundidade de 0-5cm

Na profundidade de 0-5cm, o tráfego foi determinante nas alterações da porosidade, e não ocorreu efeito dos métodos de preparo do solo. O tráfego de colheitadeiras carregadas eliminou os possíveis efeitos do preparo na superfície do solo. A magnitude das cargas aplicadas no solo são maiores que os efeitos do preparo, influenciando assim todos os parâmetros da porosidade do solo.

As figuras 3 e 4 mostram os resultados da amostragem realizada em 04/90 e 05/91, respectivamente. Na coleta realizada em 04/90 o tráfego reduziu em 24% e 91% o volume de poros totais e a porosidade de aeração, respectivamente. A microporosidade do solo teve um acréscimo de 10%. Estas alterações têm importantes aspectos práticos, e vários processos físicos podem estar sendo comprometidos.

A porosidade de aeração foi reduzida para valores próximos de zero, e conseqüentemente têm implicações nos processos de difusão gasosa no solo e na transmissão de água em profundidade. Os macroporos contínuos são importantes para o rápido fluxo de água no solo, no entanto são suscetíveis aos efeitos do tráfego (CULLEY et al., 1987). Os resultados de literatura demonstram que taxas aceitáveis de difusão gasosa ocorrem até quando a porosidade de aeração situa-se entre 0.10 e 0.12 cm³/cm³ (VOMOCIL e FLOCKER, 1966).

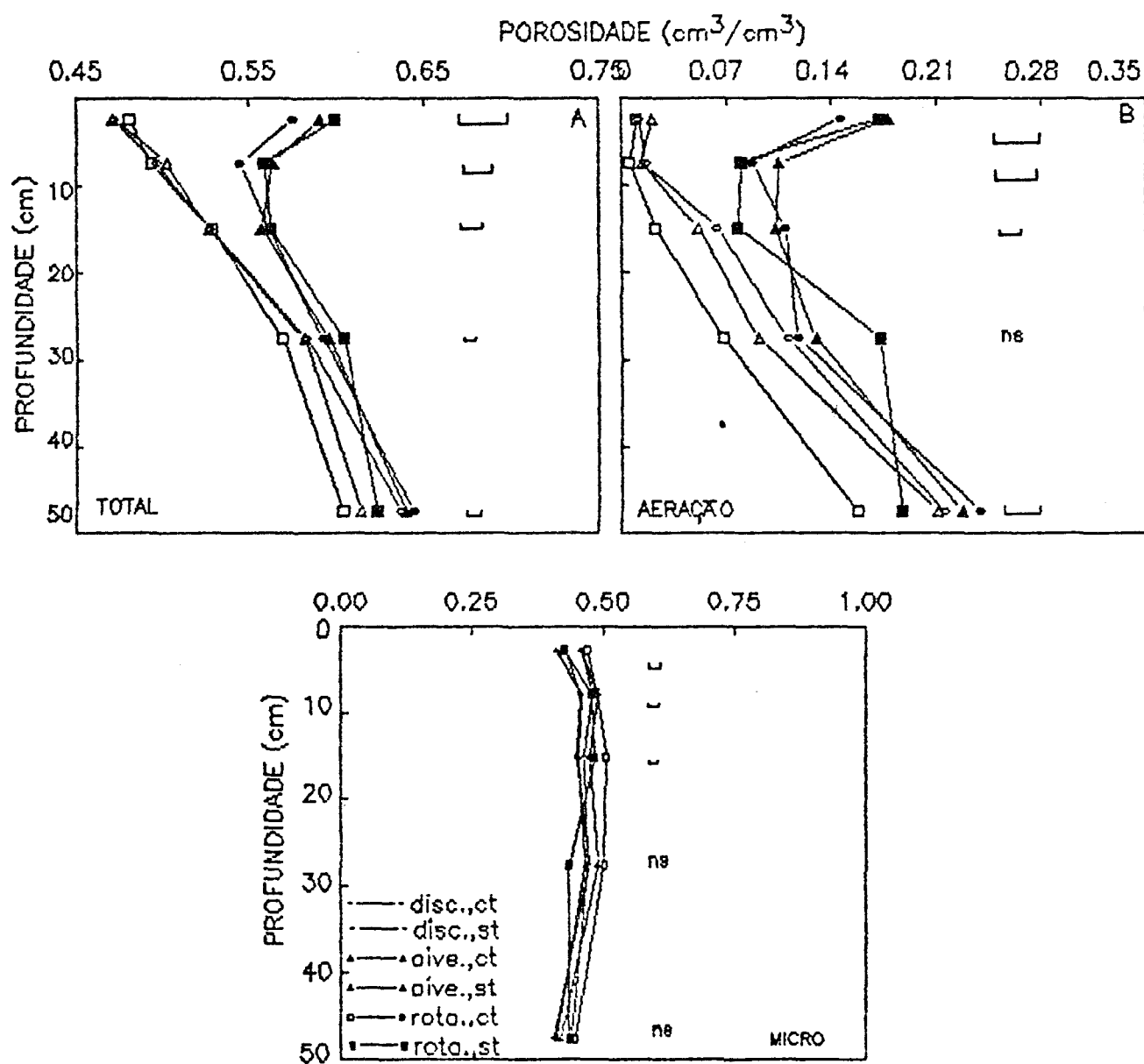


Fig.3. Caracterização do volume de poros totais (A), porosidade de aeração (B) e microporos (C), da amostragem realizada em 04/90.

Tomando como base estes valores, pode se prever que o tráfego de máquinas pesadas implicará na ocorrência de sítios anaeróbicos, sob condições mais úmidas. Este fato tem implicações na diminuição da eficiência de aplicação de fertilizantes nitrogenados no solo e na redução da produtividade das culturas. Também pode ocorrer redução no transporte rápido de água no solo, e por consequência o volume de água que infiltra e é armazenado sofre redução, aumentando o deflúvio superficial.

A redução no volume de macroporos, ou poros de aeração, pelo tráfego ocorreu em ambas amostragens. Na amostragem realizada em 05/91, a macroporosidade foi reduzida em 94% na entre-linha trafegada comparado a entre linha não trafegada. Os prováveis macroporos criados pelo sistema radicular das culturas e mesofauna foram eliminados pelo tráfego da colheitadeira na colheita da soja. Na entre linha sem tráfego a porosidade de aeração também foi reduzida, face o adensamento natural da estrutura do solo. Não houve efeito do preparo sobre a porosidade do solo nesta profundidade. Os valores médios de porosidade de aeração foram de 0,01 e 0,014 cm³/cm³ na entre-linha trafegada, e 0,18 e 0,17 cm³/cm³ na entre-linha sem tráfego, nas amostragens 04/90 e 05/91, respectivamente.

Para evidenciar com precisão as mudanças da porosidade em superfície, seria necessário um maior número de amostragens. Entre os tráfegos de colheitadeiras não foi realizado nenhuma amostragem adicional, devido as dificulda-

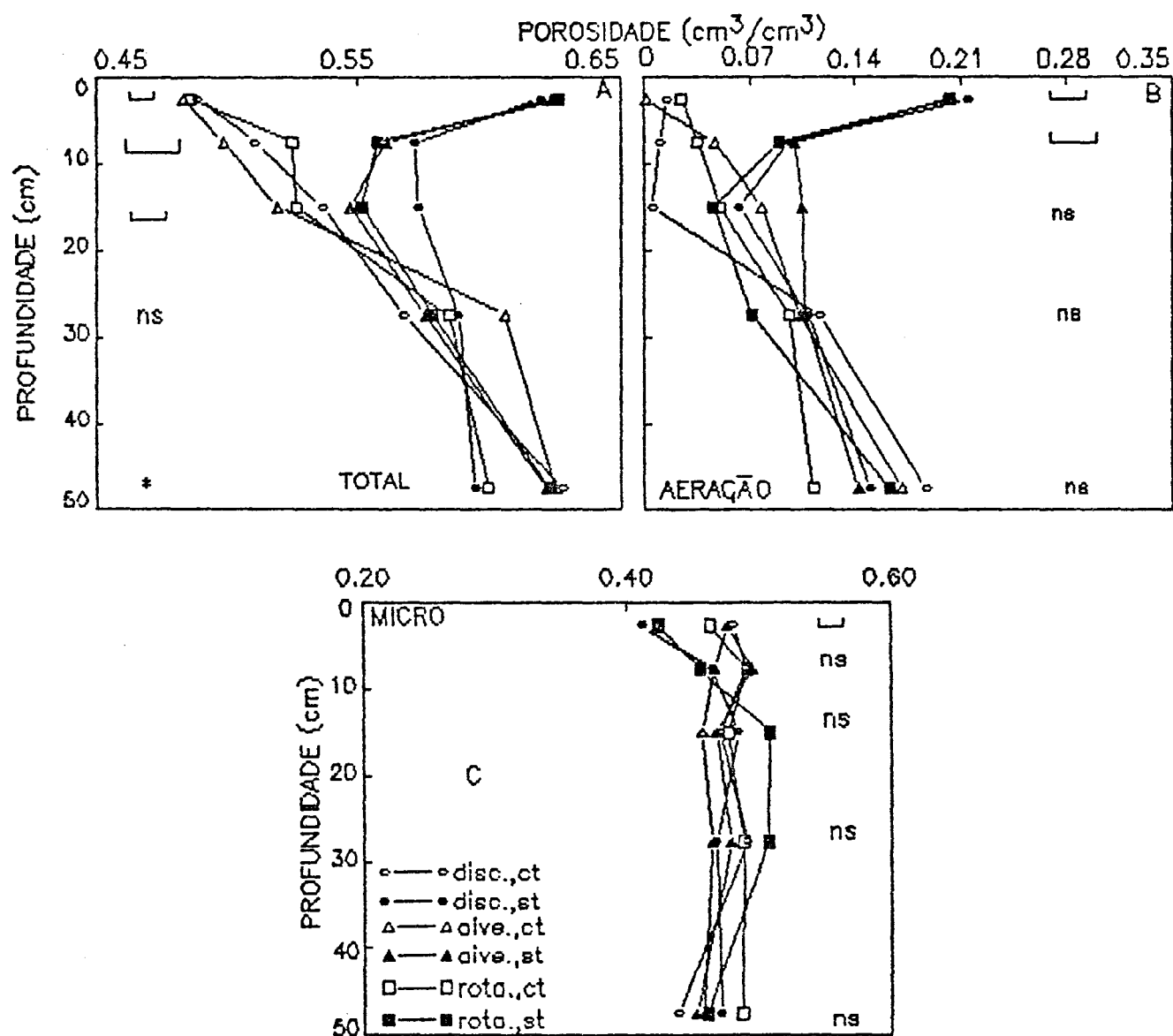


Fig.4. Caracterização do volume de poros totais (A), porosidade de aeração (B) e microporos (C), da amostragem realizada em 05/91.

des operacionais. A comparação entre as duas amostragens realizadas revelou que houve um aumento na porosidade total, macroporos e porosidade de aeração, em maior intensidade na entre-linha sem tráfego. Este acréscimo na porosidade pode estar relacionado com a atuação do sistema radicular das culturas, principalmente da cultura da avela, utilizada como cobertura de inverno. Em relação ao estado anterior à implantação do experimento, os resultados demonstram que a compactação pelo tráfego promoveu drásticas alterações na porosidade do solo, com efeitos negativos sobre o ambiente radicular nesta profundidade. Houve uma equivalência entre os valores de porosidade total, e um aumento no volume de poros de aeração na entre-linha sem tráfego. Na área trafegada ocorreram reduções significativas nestes parâmetros após a implantação do experimento.

Profundidade de 5-10cm.

Na primeira amostragem foi observado apenas efeito estatisticamente significativo do tráfego sobre a porosidade do solo. O tráfego promoveu reduções de 11% e 88% na porosidade total e porosidade de aeração, respectivamente, ao passo que microporosidade aumentou em aproximadamente 5%, comparados a área não trafegada. O volume de poros com ar na capacidade de campo foi de 0.01 e 0.10 cm³/cm³ na área trafegada e não trafegada, respectivamente. As alterações na porosidade total foram consequência, principalmente, da redução no volume de macroporos, mais do que propriamente

um aumento absoluto no volume de microporos. Em termos relativos, ocorreu um aumento da microporosidade no solo compactado, em função da redução proporcional na porosidade total, enquanto que o volume absoluto de microporos teve pequenos acréscimos. Este comportamento tende a permanecer no tempo, já que a compactação modifica o volume de poros entre agregados estabelecidos durante a recuperação da estrutura do solo. O volume de poros intra-agregados não é alterado pela compactação do solo (CURRIE, 1984).

A estrutura criada pelos diferentes métodos de preparo do solo não resistiu aos efeitos do tráfego, de modo que nestas condições a recuperação da estrutura é em sequência destruída pelo tráfego, principalmente durante a colheita.

Já na coleta realizada em 05/91, a porosidade total foi reduzida em 26% e a porosidade de aeração em 28%, após o tráfego de máquinas. Os sistemas de preparo comportaram-se distintamente com a porosidade total na sequência alvecas>rotativo>discos na entre linha trafegada e alvecas>discos>rotativo na entre-linha não trafegada. O preparo com arado de discos foi menos resistente aos efeitos da compactação nesta profundidade, demonstrado pela menor porosidade de aeração, provavelmente devido ao efeito do confinamento causado pela camada compactada subsuperficial mais próxima da superfície do solo. O arado de alvecas promoveu uma menor mobilização que os outros sistemas de preparo, resultando em uma melhor estrutura.

Nesta profundidade ocorreu uma pequena variação temporal da porosidade. Na comparação entre as coletas, o volume de poros totais aumentou em 3% na área tráfegada e foi reduzido em cerca de 2% na ausência do tráfego. Este comportamento provavelmente reflete, respectivamente, os efeitos da recuperação da estrutura devido ao sistema radicular da culturas e do adensamento do solo associado com variações no potencial da água no solo, induzindo ciclos de secagem e umedecimento. Houve também um aumento de 6% na porosidade de aeração na entre-linha tráfegada dos preparos com alvecas e rotativo. O tráfego promoveu um aumento na variabilidade da porosidade nesta profundidade. Isto significa que amostras de pequenas dimensões podem não representar adequadamente um solo compactado, dificultando a realização de estimativas mais precisas sobre a porosidade de aeração entre as duas amostragens realizadas. Na presença do tráfego, ocorreram reduções na porosidade total e porosidade de aeração em relação a pré-implantação do experimento.

Profundidade de 10-20cm.

A análise de variância demonstrou efeitos dos métodos de preparo e do tráfego sobre a porosidade do solo (Fig.3), na coleta 04/90. O tráfego reduziu em 6% a porosidade total e em 36% a porosidade de aeração na primeira amostragem. Na amostragem realizada em (05/91) houve redução

de 6% na porosidade total pelo tráfego, e nenhum efeito dos tratamentos sobre os outros parâmetros analisados. O preparo com arado rotativo promoveu acréscimos de cerca de 10% sobre a microporosidade nas entre linhas com e sem tráfego, comparados aos preparos convencionais, que não diferiram entre si. Isto significa que os efeitos do tráfego e da adensamento natural do solo foram equivalentes no preparo rotativo. A mobilização mais intensa do solo pelo preparo rotativo provavelmente tornou mais instável sua estrutura, e assim mais suscetível às forças aplicadas ao solo, comparado aos preparos convencionais. O tráfego promoveu uma redução de 58% na porosidade de aeração, e seu valor médio foi de 0,045 cm³/cm³, ainda bem abaixo do limite mínimo de 0.10cm³/cm³ até a profundidade de 20cm.

Na comparação da porosidade entre as duas amostragens, a análise de variância demonstrou que não ocorreu variação estatisticamente significativa entre as amostragens. Ocorreu uma interação do tráfego com a data de amostragem. O menor valor de porosidade de aeração ocorreu na entre-linha trafegada do preparo com arado de discos, indicando maiores danos a estrutura do solo sobre este método de preparo.

Profundidade de 20-35cm.

Nesta profundidade o tráfego foi ainda efetivo nas alterações da porosidade do solo, na primeira coleta(04/90) (Fig.3A). A porosidade total foi reduzida em 6% nesta profundidade. As diferenças ocorreram no preparo com arado rotativo com tráfego, refletindo a distribuição de cargas em

maior profundidade, provavelmente devido a ausência do confinamento no perfil revolvido. Estes resultados estão em concordância com aqueles obtidos para densidade do solo, devido a interdependência entre as duas variáveis.

A porosidade de aeração (Fig.3B) na entre linha compactada foi reduzido em 56%, comparado com a ausência do tráfego. O efeito do tráfego na redução deste parâmetro tem sido demonstrado por outros trabalhos (GUPTA et al., 1989; CARTER, 1988). A redução da macroporosidade até 35cm, poderá implicar num menor volume de solo facilmente explorado pelas raízes, além de redução na capacidade de armazenamento e transporte de água no solo.

Na amostragem realizada em 04/90, a porosidade de aeração foi afetada pelos métodos de preparo e pelo tráfego. O preparo com arado rotativo diferiu dos preparos convencionais, na ausência e presença do tráfego. A menor porosidade de aeração ocorreu na área trafegada do preparo rotativo, demonstrando que a distribuição de cargas no perfil ocorre em maior profundidade na ausência de camadas compactadas em subsuperfície, principalmente após a intensa mobilização da estrutura do solo por este método de preparo. A linha não trafegada do preparo com arado rotativo apresentou a maior porosidade de aeração, a qual é consequência da maior mobilização do solo e da mínima influência dos processos de adensamento natural nesta profundidade. No preparo com arado rotativo ocorreu uma maior participação da macroporosidade sobre a porosidade

total, comparado aos outros métodos de preparo. A ausência dos efeitos do tráfego sobre a porosidade na coleta de 05/91 pode ser atribuída à maior variabilidade dos resultados obtidos, podendo ser evidenciado comparando as figuras 3 e 4. Observa-se também uma tendência de menor macroporosidade no preparo rotativo, na entre-linha trafegada, provavelmente resultante da compactação em profundidade. Os preparos convencionais apresentaram comportamentos idênticos, não fornecendo indicações dos efeitos do preparo com arado de alvecas sobre a estrutura do solo. Há uma ligeira tendência da microporosidade ser maior sobre o preparo com arado rotativo. Não houveram diferenças estatisticamente significativas entre as amostragens.

Profundidade de 35-60cm.

Na amostragem realizada em 04/90, o preparo com arado rotativo resultou em menor porosidade total, comparado aos preparos convencionais, que não diferiram entre si. Já na coleta realizada em 05/91, a análise de variância demonstrou interação entre o preparo e tráfego. A menor porosidade total é resultado da intensa mobilização do solo, desestruturando-o. A avaliação temporal da porosidade total revelou uma interação entre tráfego e preparo sobre a porosidade total. As razões para tal não são claras. A porosidade de aeração foi reduzida pelo preparo rotativo em aproximadamente 30% na amostragem de 04/90, comparado aos preparos convencionais, independente da ocorrência do tráfego. Na amostragem de 05/91 não houve efeito dos

tratamentos sobre este parâmetro. A comparação entre coletas demonstrou que houve uma redução da porosidade de aeração com o tempo, principalmente na entre-linha trafegada, significando alterações dinâmicas na porosidade do solo, com o tempo. O volume de microporos não foi afetado nesta profundidade.

Em relação a pré-implantação, as maiores alterações ocorreram na área trafegada até a profundidade de 20cm, onde os parâmetros avaliados foram bastante alterados. Na entre-linha sem tráfego ocorreram aumentos na porosidade total, macroporos e porosidade de aeração, na profundidade de 0-5cm, devido a manutenção dos efeitos do revolvimento sobre a porosidade do solo, aliado a intensa atividade de raízes e da matéria orgânica sobre o solo. Em profundidade, o arado rotativo causou reduções na porosidade total, volume de macroporos e porosidade de aeração, devido a desagregação e desestabilização da estrutura do solo.

3.2.3. Conteúdo de Água Prontamente Disponível.

O conteúdo de água retida a baixas tensões é um parâmetro importante na avaliação da estrutura do solo. Não houve efeito da calagem sobre os resultados obtidos (Quadro 11.3, anexo II). O tráfego foi o fator determinante das diferenças neste parâmetro, sendo que o preparo teve efeito significativo apenas na profundidade de 10-20cm, por ocasião da primeira amostragem.

Na amostragem realizada em 04/90, o tráfego reduziu em 50 e 20% o volume de água disponível nas profundidades de 0-5cm e 5-10cm (Fig.5). Na profundidades de 10-20 o preparo com arado de discos proporcionou menor retenção de água, provavelmente associado com o maior adensamento do solo nesta profundidade. Nas profundidades de 20-35 e 35-60cm não foram detectados efeitos dos tratamentos, provavelmente devido a elevada variabilidade dos resultados. A aplicação de calcário não foi efetiva sobre este parâmetro. Os efeitos do tráfego na redução do conteúdo de água disponível estão associados com a redução da porosidade total, constatado na avaliação da porosidade. As figuras 6, 7 e 8 demonstram o efeito do tráfego sobre os sistemas de preparo utilizados. As figuras foram construídas evidenciando os efeitos do tráfego em cada sistema de preparo. As curvas na profundidade de 0-5 e 5-10, nas entre linhas trafegadas, tomam o formato retilíneo, resultante da alteração na distribuição dos tamanhos de poros, predominando poros de menor diâmetro equivalente cilíndrico. A compactação do solo é bem caracterizada pelas curvas de retenção de água no solo. No preparo com arado de discos, comparado com alvecas e rotativo, há uma tendência de menor retenção de água sob altos potenciais, em consequência dos efeitos mais intensos do tráfego sobre a porosidade total.

Na segunda amostragem (05/91), os efeitos do tráfego ocorreram até a profundidade de 20cm, nos tratamentos amostrados. Estes resultados são indicativos dos efeitos do

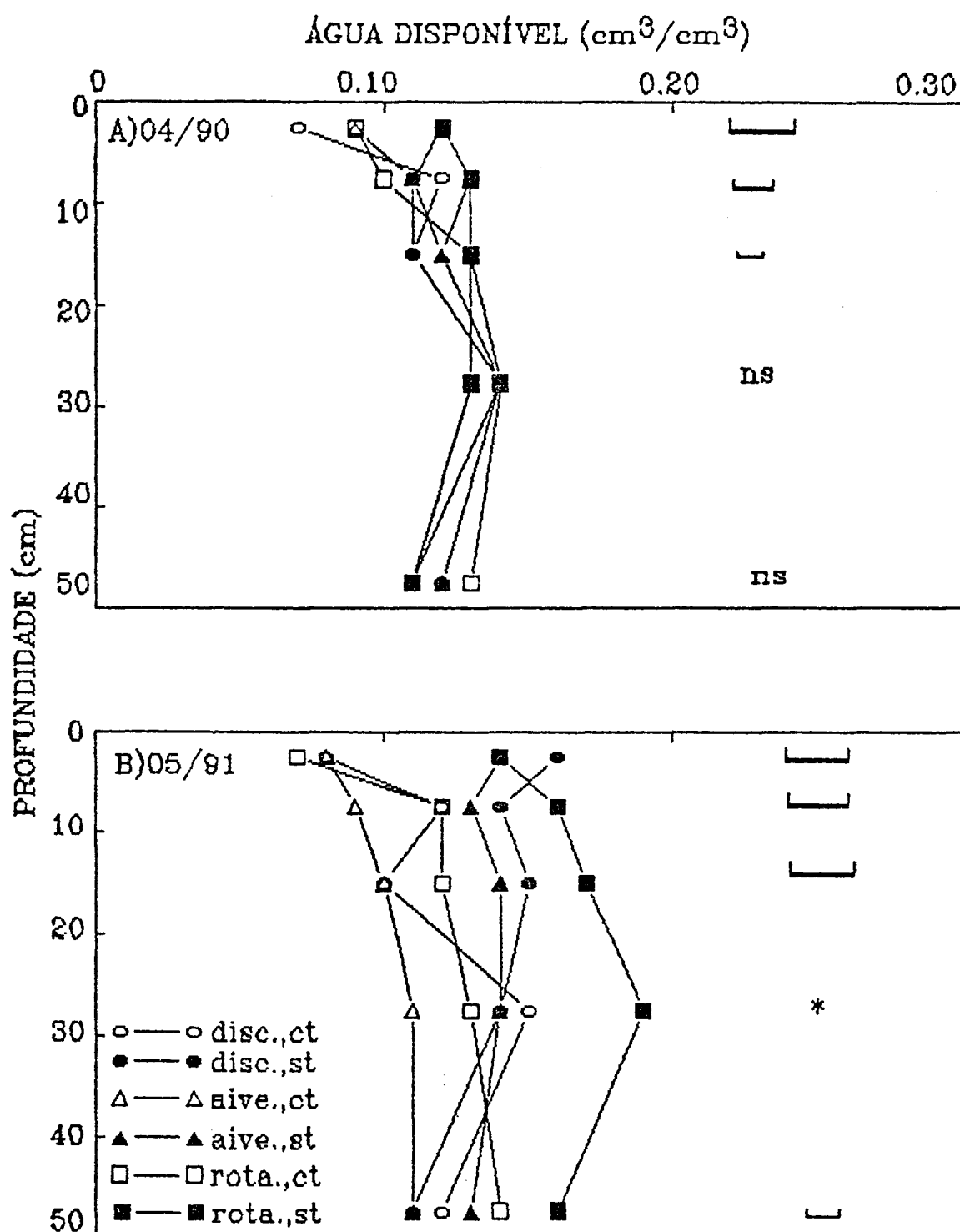


Fig.5. Conteúdo de água disponível entre potenciais de $-6,0$ kPa e -100 kPa, nas amostragens realizadas em 04/90 (A) e 05/91 (B).

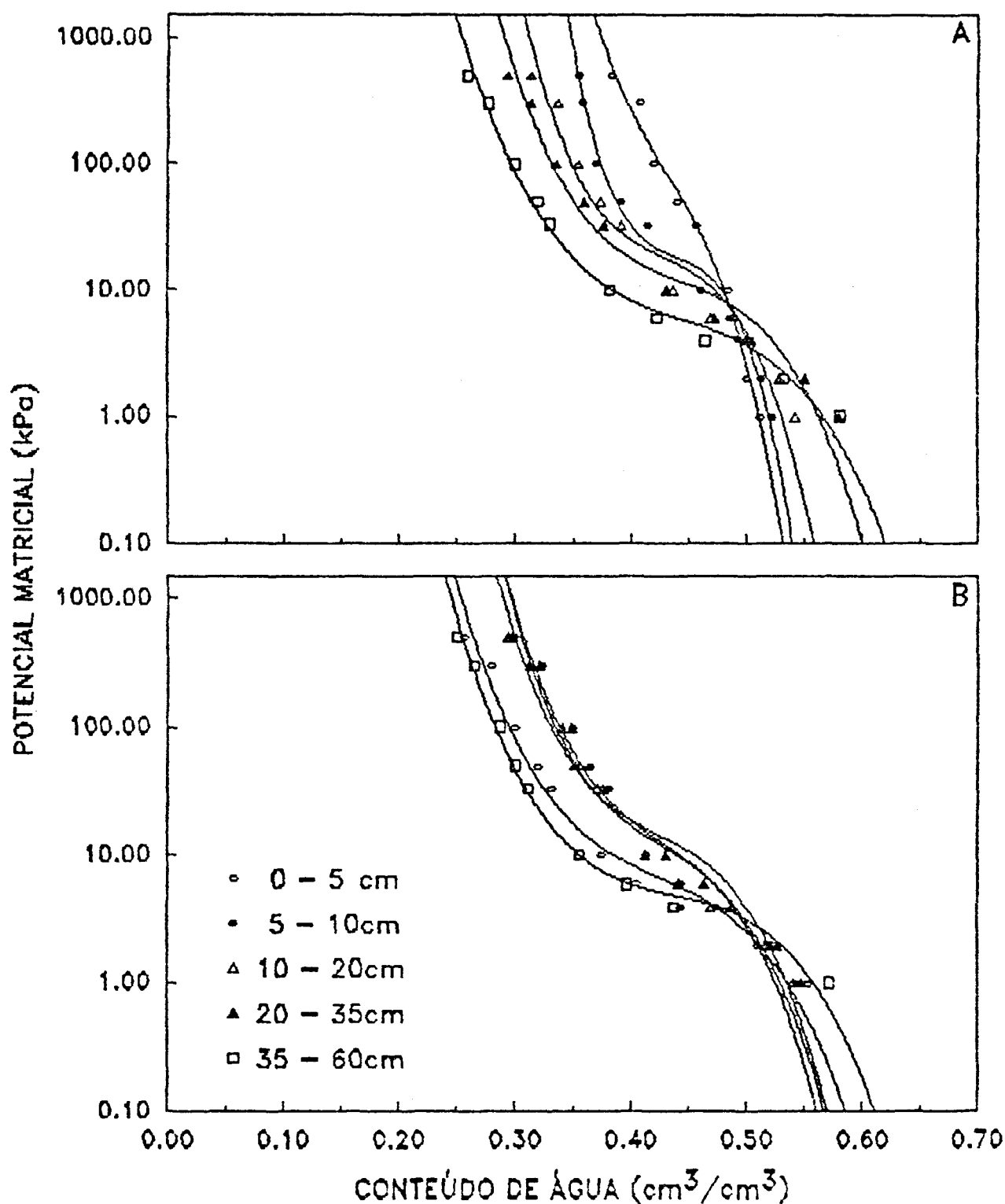


FIG.6. Curva de retenção de água no solo, tratamento de preparo com arado de discos, com tráfego (A) e sem tráfego (B), amostragem 04/90.

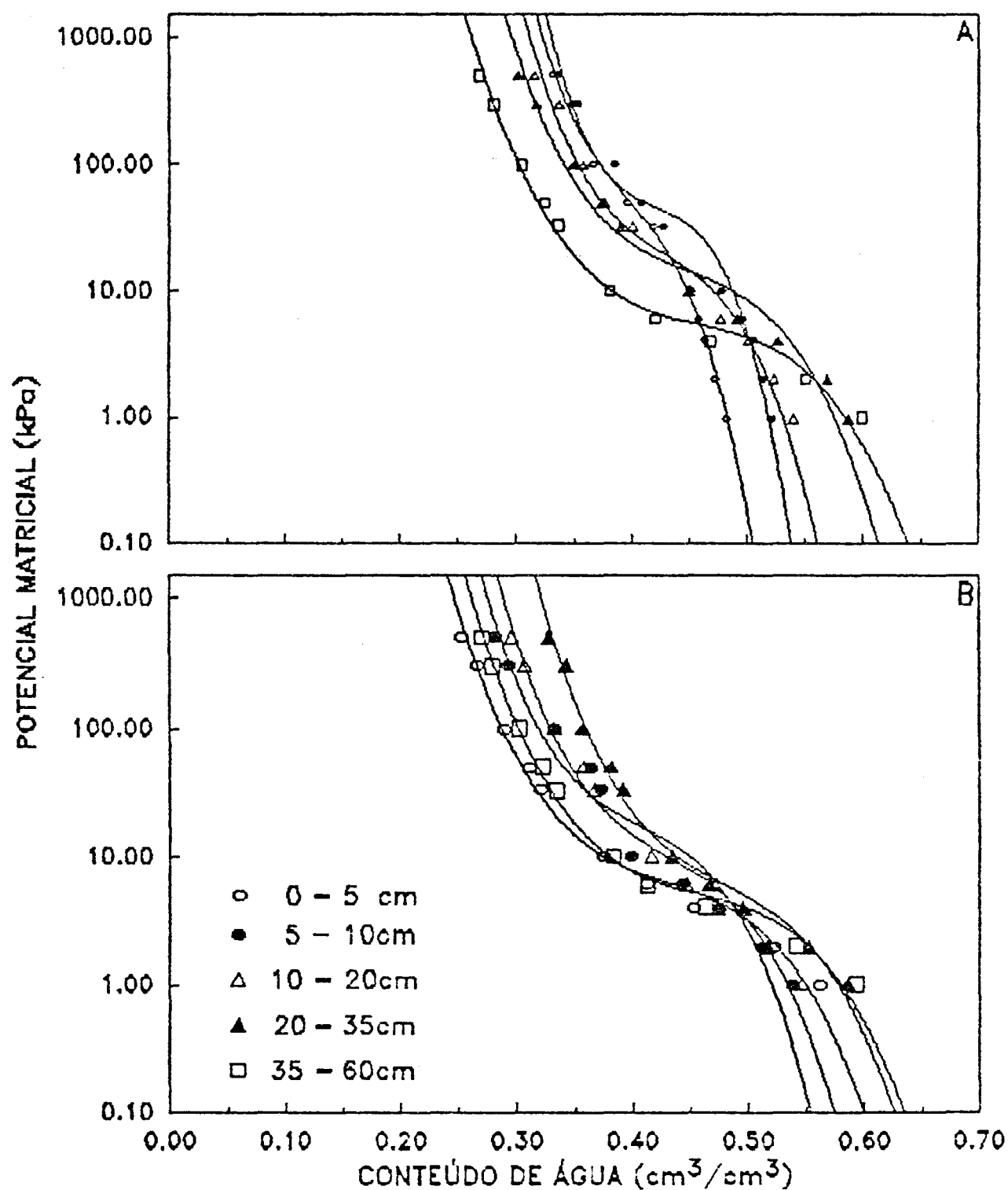


FIG.7. Curva de retenção de água no solo, tratamento de preparo com arado de aivecas, com tráfego (A) e sem tráfego (B), amostragem 04/90.

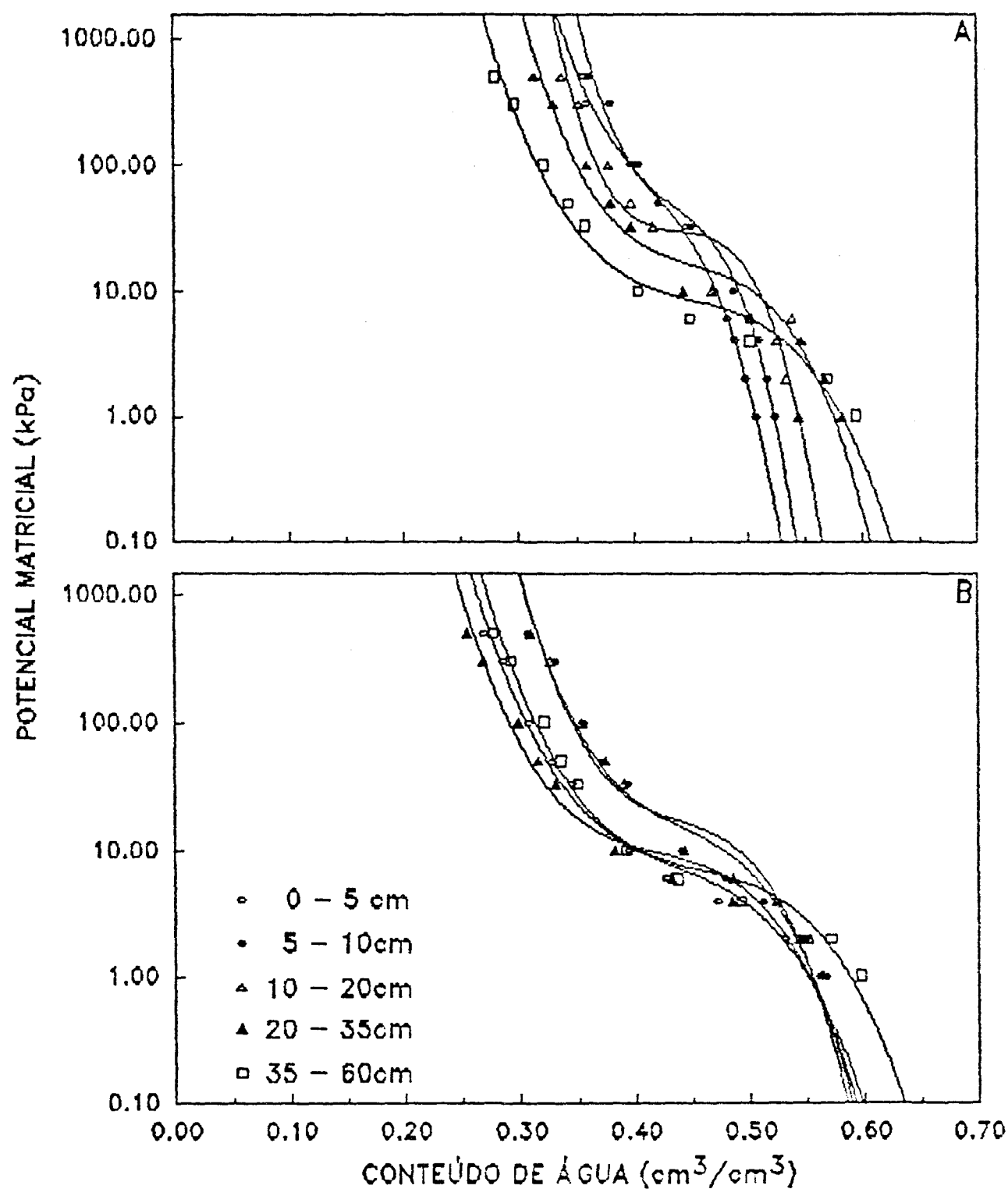


FIG.8. Curva de retenção de água no solo, tratamento de preparo com arado rotativo, com tráfego (A) e sem tráfego (B), amostragem 04/90.

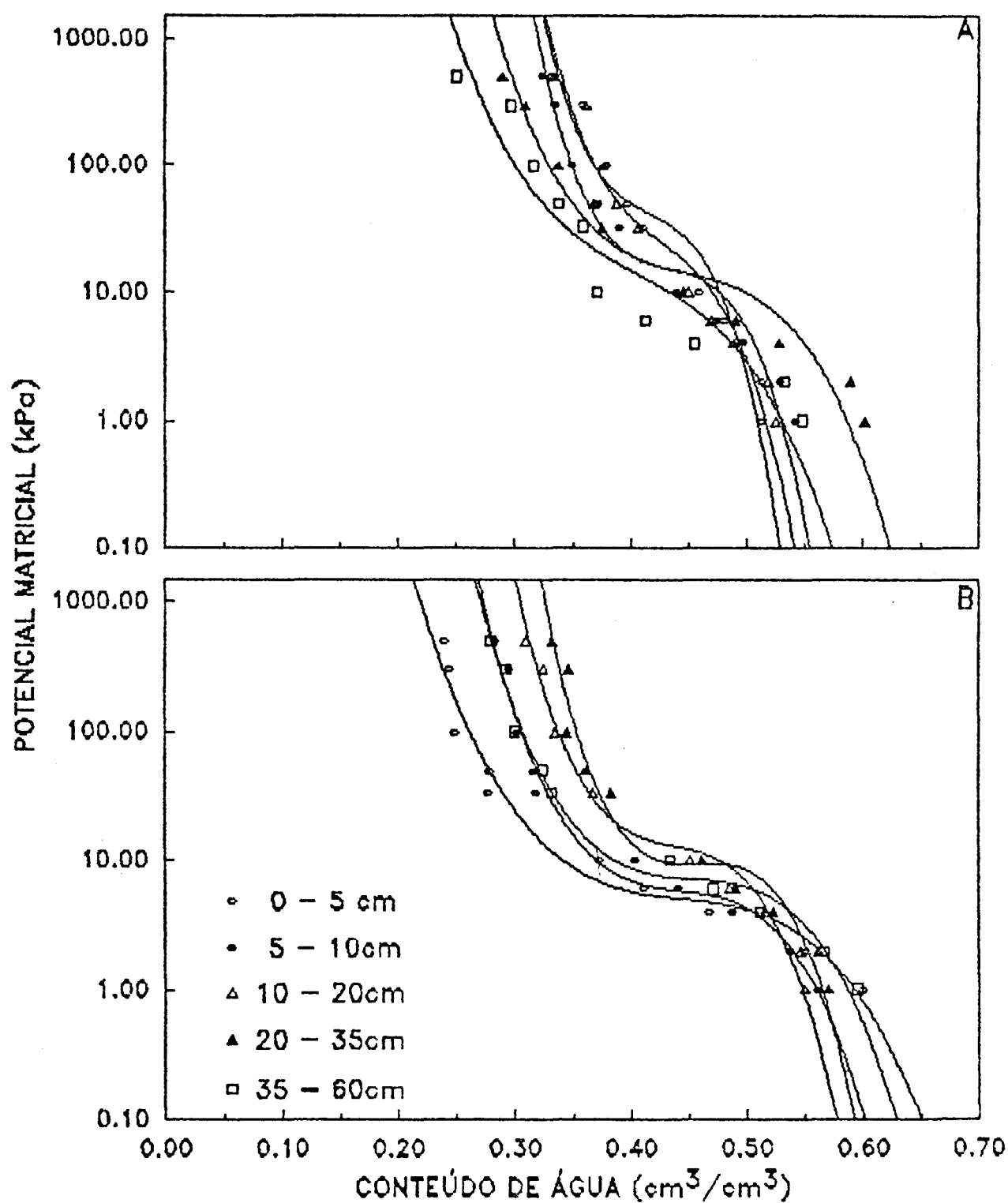


FIG.9. Curva de retenção de água no solo, tratamento de preparo com arado de discos, com tráfego (A) e sem tráfego (B), amostragem 05/91.

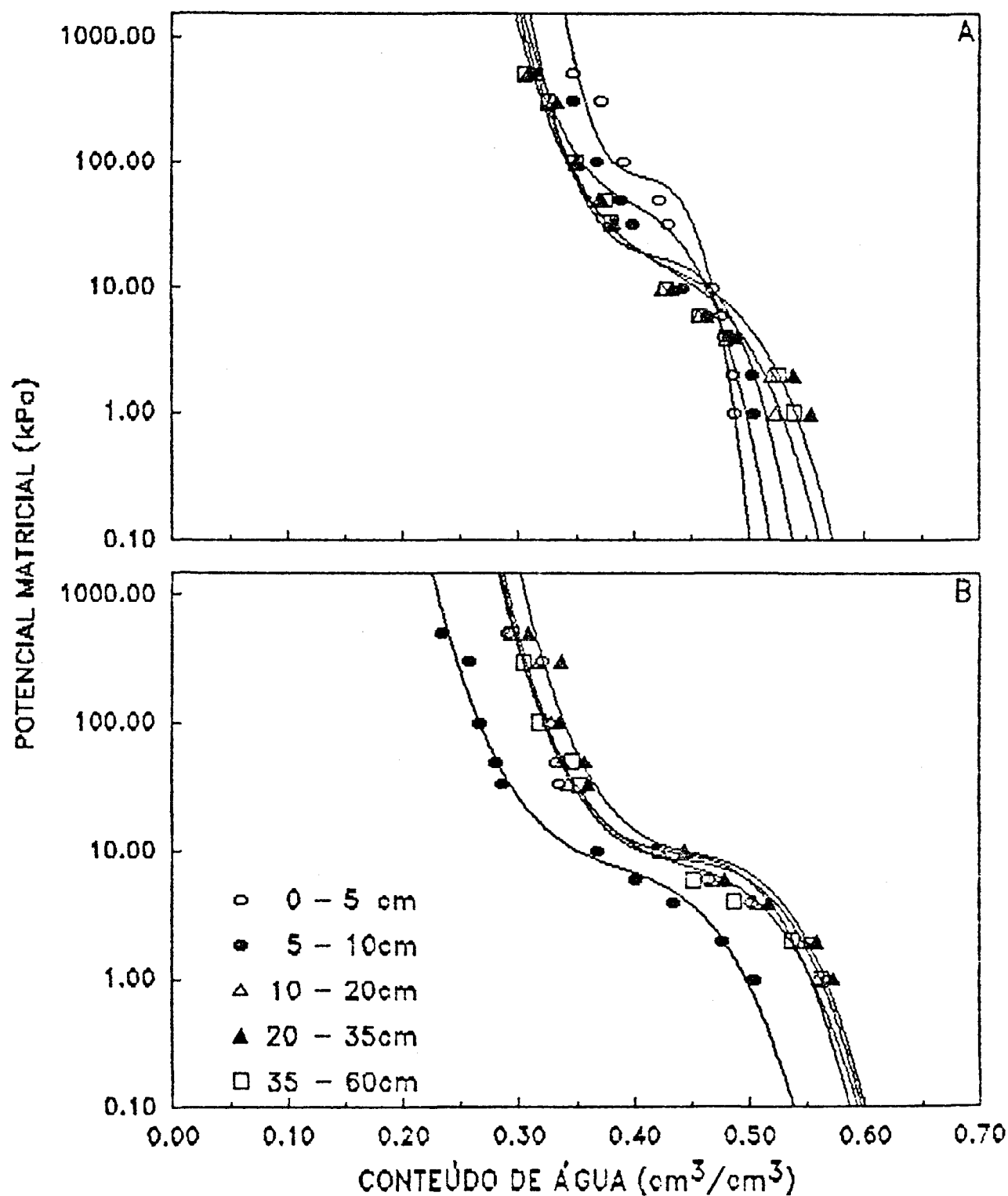


FIG.10. Curva de retenção de água no solo, tratamento de preparo com arado de aivecas, com tráfego (A) e sem tráfego (B), amostragem 05/91.

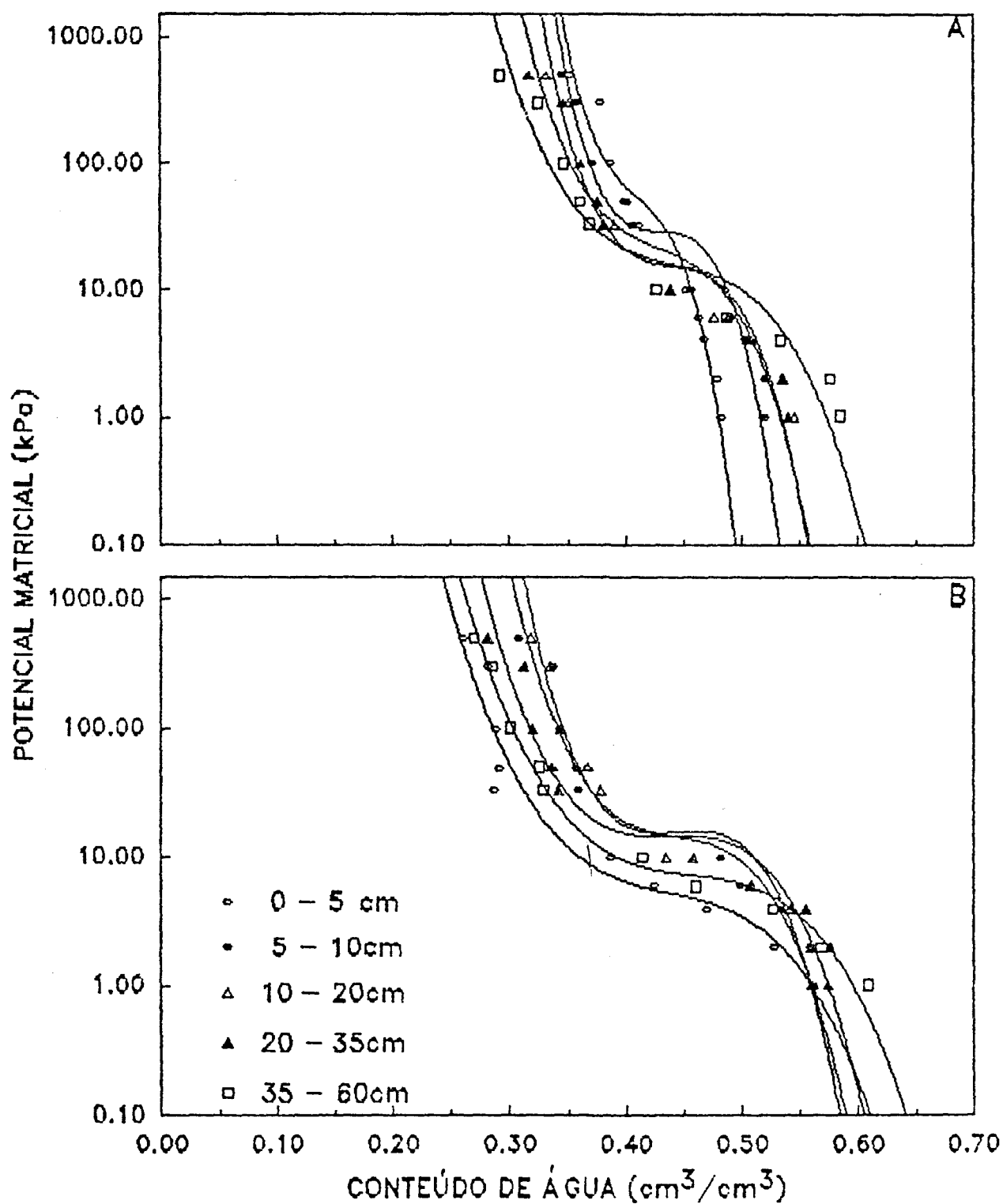


FIG.11. Curva de retenção de água no solo, tratamento de preparo com arado rotativo, com tráfego (A) e sem tráfego (B), amostragem 05/91.

tráfego até esta profundidade e da consequente eliminação dos efeitos do preparo. O tráfego de colheitadeiras na colheita da soja estendeu seus efeitos mais profundamente.

As curvas de retenção de água nesta coleta são representadas pelas figuras 9, 10 e 11. As curvas de retenção determinadas nos tratamentos de preparos convencionais, na presença da calagem, apresentam maior compactação nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20cm, mostrando também a maior distribuição dos efeitos da compactação em profundidade, com o segundo tráfego de colheitadeiras (Fig.11.1, anexo 11).

A comparação entre as amostragens demonstra que nas profundidades de 20-35cm e 35-60cm ocorreram interações entre preparo, tráfego e data de amostragem. A variabilidade dos resultados foi bastante grande. O conteúdo de água no solo é dinâmico com o tempo, face a interferência dos tratamentos aplicados e dos fatores ambientais sobre a estrutura do solo. Na profundidade de 10-20cm houve interação do tráfego com a data de amostragem, demonstrado pela redução no volume de água disponível nesta profundidade, na linha trafegada por ocasião da amostragem realizada em 05/91.

4.DISCUSSÃO.

Os resultados obtidos na avaliação da porosidade e água disponível, até 20cm de profundidade, não demonstram existir qualquer estabilização das propriedades físicas do

solo, resultante dos efeitos do tráfego. Nas áreas sem tráfego há uma evidente estabilização nos parâmetros avaliados, consequência da retificação e estabilização mais rápida da estrutura. O tráfego continuou alterando a porosidade até 35cm, sem que houvesse estabilização no tempo. Os resultados do conteúdo de água disponível sugerem que este parâmetro está sendo alterado com os tráfegos subsequentes, e que é dinâmico no tempo. Em profundidade, apenas o preparo rotativo promoveu alterações estatisticamente importantes sobre a porosidade, uma vez que os preparos convencionais atuaram somente até 20-35cm, no máximo. Os resultados também sugerem que a distribuição da compactação tem influência da presença de camadas adensadas em subsuperfície, as quais atuam confinando o perfil de distribuição das cargas no solo. O maior volume de água retida a 35-60cm, na segunda coleta, sob a área trafegada do preparo com arado rotativo, é demonstrativo do maior adensamento do solo nesta profundidade, pelas cargas aplicadas ao solo. As consequentes reduções no volume de macroporos e porosidade de aeração pelo tráfego corroboram estes efeitos em profundidade.

A eleição de um método de preparo para a implantação do sistema de plantio direto à partir destes resultados deve levar em conta alguns aspectos práticos e econômicos. O preparo com arado rotativo é economicamente inviável, e foi utilizado no experimento para auxiliar a compreensão dos mecanismos envolvidos na alteração das propriedades físicas

analisadas. Os preparos convencionais proporcionaram maior compactação em superfície, devido o efeito de confinamento do perfil, já discutido. Levando em conta que a compactação no sistema de plantio direto é inevitável, à longo prazo, a concentração da compactação em superfície pode ser benéfica, pois a remoção futura desta compactação superficial é mais prática e econômica. A desvantagem é que o período de tempo entre a instalação do plantio direto e o retorno ao preparo convencional para eliminar estes efeitos, pode ser mais curto. Já os preparos mais profundos tendem a compactar um maior volume de solo com tempo devido a distribuição mais profunda das cargas no perfil. O intervalo de tempo para proceder a descompactação é maior, no entanto, pode ser necessário alterar um maior volume de solo, exigindo mais potência e maior tempo para a realização da operação.

Estes resultados não permitem concluir ainda qual sistema de preparo é mais adequado, devido ao tempo de avaliação a que foi submetido e a alteração dinâmica do solo, mas fornece indicações do comportamento do solo sob os diferentes sistemas de preparo nos dois primeiros anos de implantação do plantio direto. Avaliações subsequentes, eventualmente alterando alguns aspectos metodológicos envolvidos, poderão ser mais conclusivas.

A metodologia utilizada demonstrou bem os efeitos da compactação sobre as propriedades físicas avaliadas. A degradação da estrutura superficial do solo pelo tráfego, com porosidade de aeração da ordem de 0.01 cm³/cm³ até 10cm

de profundidade, podem provocar drásticas reduções de produtividade daquela área, sob plantio direto. No quadro 11.5, anexo 11, são apresentados os dados de produtividade das culturas de milho e soja, conduzidas na área experimental. A análise de variância não mostrou efeito significativo dos tratamentos sobre a produtividade do milho. Já a produtividade da cultura da soja foi significativamente influenciada pelo tráfego, e pela interação preparo e tráfego (quadro 11.6, anexo 11). Os desvios padrões mostraram também maior variabilidade dos resultados na entre-linha trafegada, demonstrando assim um comportamento similar da produtividade com as propriedades físicas do solo, cuja variabilidade foi maior também na entre-linha trafegada. O tráfego no preparo a 20cm de profundidade reduziu em cerca de 23% a produtividade da soja, podendo ser uma indicação da maior compactação do solo neste sistema de preparo, induzida pelo efeito de confinamento do perfil. Nos preparos a 35cm e 60cm, as produtividades foram praticamente similares nas entre-linhas com e sem tráfego.

A estabilidade e continuidade dos macroporos no plantio direto pode compensar a maior compactação em superfície, e influenciar na produtividade das culturas. Pela sua importância no sistema de plantio direto, a atividade da mesofauna, principalmente o papel das minhocas sobre as propriedades físicas do solo, não tem sido avaliada de forma quantitativa em nossas condições, exigindo maior

atenção da pesquisa aplicada. Uma avaliação mais segura e precisa do sistema poroso, com representatividade capaz de amostrar melhor os grandes poros formados pela atividade da mesofauna e do sistema radicular, deveria utilizar-se de amostras em maior número ou de maior volume. A determinação da curva de retenção "in situ" pode ser uma alternativa para melhorar a precisão das estimativas, apesar das dificuldades de operacionalização.

Assim, a discussão dos aspectos metodológicos se faz necessário para garantir que as conclusões sobre os efeitos dos métodos de preparo e do tráfego permitam aumentar o entendimento dos mecanismos atuantes.

7. CONCLUSÕES.

Os resultados demonstraram que:

1. O tráfego foi o principal fator na alteração da porosidade do solo, com reflexos na densidade do solo e retenção de água, inclusive sobrepondo os efeitos do preparo. A calagem não teve efeito significativo sobre os parâmetros analisados.

2. A compactação pelo tráfego de máquinas reduziu a porosidade total e de aeração, o conteúdo de água retida entre as tensões de 6 kPa e 100 kPa, e aumentou a variabilidade destas propriedades. A porosidade de aeração foi reduzida para valores abaixo de 0.10 cm³/cm³.

3. Ocorreu um processo de reversão nas propriedades físicas avaliadas, em relação a pré-implantação, na entre-linha trafegada.

SUMMARY

Penetration Resistance and Porosity in No-tillage Influenced by Previous Tillage, Liming and Traffic

Surface soil compaction and surface placement of fertilizers and amendments can impose yield limits under no-tillage, which may require corrective tillage. Three tillage systems prior to no-tillage, and two lime levels were studied in a Dark Red Latossol (Haplorthox) with controlled traffic. We evaluated soil penetration resistance and porosity during the first two years after beginning no-tillage. Surface traffic caused an increase in penetration resistance and soil density, and a decrease in total pore volume, and in air-filled porosity. Water content between -6 kPa and -100 kPa was also decreased by traffic. Penetration resistance proved to be an appropriate parameter to evaluate the effects of traffic and natural soil compaction, and their temporal variation. Penetration resistances, quantified as cone index, were not restrictive to root growth when corrected to a standard water content of 0,34 g/g. Presence of a sub-surface compacted layer seem to have influenced the compaction distribution in depth, due to a confining effect. Surface effects of previous tillage were obliterated by traffic, which was the most important factor in altering the soil structure.

ANEXOS

ANEXO I

Quadro 1.1. Resultados de análise granulométrica após a
instalação do experimento.

Quadro 1.2. Resultados de densidade de partículas por
tratamento de preparo.

Quadro 1.3. Caracterização química do solo antes da
instalação do experimento.

Quadro 1.4. Resumo dos resultados da análise de variância do
índice de Cone por profundidade e data de
amostragem.

Quadro 1.5. Resumo dos resultados da análise de variância da
comparação do índice de Cone entre as datas de
amostragens.

Quadro 1.1. Resultados da análise granulométrica após a instalação do experimento, médias de três repetições. Os valores entre parentêses referem-se ao desvio padrão da média.

Preparo	Prof.(cm)	Areia fina	Areia grossa	Areia total	Silte	Argila
DISCOS a 20 cm	0-10	18.13 (0.99)	19.80 (1.11)	37.50 (0.60)	16.07 (1.50)	46.00 (2.00)
	10-20	18.47 (0.42)	17.93 (1.68)	35.40 (2.12)	15.15 (2.68)	48.00 (2.60)
	20-30	18.27 (0.12)	16.60 (1.40)	35.27 (1.22)	15.13 (0.83)	50.00 (4.00)
	30-40	18.53 (1.50)	16.20 (0.72)	34.13 (1.14)	13.27 (0.83)	52.00 (0.0)
	40-50	18.60 (1.25)	16.20 (2.0)	33.33 (1.62)	11.47 (0.72)	54.67 (1.15)
	50-60	18.50 (1.15)	14.74 (0.20)	34.06 (0.50)	11.73 (0.80)	54.00 (2.31)
AIVECAS a 35 cm	0-10	18.87 (1.51)	18.67 (1.53)	37.53 (2.21)	14.47 (2.21)	48.00 (0.0)
	10-20	18.13 (0.81)	18.93 (1.01)	37.07 (1.81)	14.93 (1.81)	50.00 (0.0)
	20-30	17.67 (2.66)	17.20 (1.51)	34.87 (4.12)	15.13 (2.32)	52.00 (2.00)
	30-40	16.80 (0.40)	17.87 (0.99)	34.67 (0.50)	13.33 (0.50)	53.33 (0.0)
	40-50	18.27 (1.03)	17.13 (1.14)	34.33 (1.20)	12.33 (3.59)	56.00 (2.00)
	50-60	18.20 (0.31)	17.13 (1.14)	34.60 (4.20)	10.13 (3.50)	56.00 (2.00)
ROTATIVO a 60 cm	0-10	18.00 (0.80)	20.87 (2.00)	38.87 (2.30)	11.80 (1.40)	49.33 (1.15)
	10-20	19.53 (2.23)	18.40 (2.09)	37.93 (0.61)	12.73 (0.61)	49.33 (1.15)
	20-30	18.07 (1.72)	19.40 (0.72)	37.47 (1.79)	12.53 (1.79)	50.00 (0.00)
	30-40	18.07 (0.76)	19.00 (1.40)	37.07 (1.75)	13.40 (1.75)	51.33 (0.00)
	40-50	18.33 (1.53)	18.53 (1.40)	35.47 (1.80)	11.87 (1.17)	52.67 (2.31)
	50-60	17.16 (1.31)	18.27 (2.61)	35.57 (2.86)	11.00 (1.17)	53.33 (2.10)

Obs. Os valores entre parenteses referem-se ao desvio padrão da média.
metodo utilizado: Vettori

QUADRO 1.2. Resultados de densidade de partículas (g/cm³) por tratamento de preparo. Os resultados são médias de três repetições.

Prof. (cm)	Disc. a 20 cm	Alvec. a 35 cm	Rotatl. a 60 cm
0-10	2.58 (0.07) ¹	2.69 (0.05)	2.69 (0.07)
10-20	2.65 (0.07)	2.67 (0.06)	2.69 (0.06)
20-30	2.64 (0.06)	2.65 (0.03)	2.66 (0.01)
30-40	2.66 (0.05)	2.67 (0.09)	2.70 (0.04)
40-50	2.68 (0.03)	2.73 (0.04)	2.68 (0.08)
50-60	2.69 (0.08)	2.69 (0.09)	2.66 (0.04)

¹ -desvio padrão.

QUADRO 1.3. Caracterização química do solo antes da implantação do experimento.

Prof (cm)	pH	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	P	C
	CaCl ₂		meq/100g de solo				ppm	%
0-10	5.2	0	5.5	4.7	3.1	0.4	9.5	2.2
10-20	4.9	0.1	6.2	2.9	1.9	0.2	3.0	2.2
20-30	4.6	0.5	5.6	1.4	0.7	0.08	0.9	2.0
30-40	4.6	0.4	5.5	1.3	0.7	0.05	0.5	1.5
40-50	4.7	0.2	5.2	1.4	0.8	0.04	-	1.5
50-60	4.8	0.06	4.8	1.5	0.9	0.03	-	1.3

Quadro 1.4. Resultados da análise da variância do IC por profundidade e data de coleta.

FATOR DE VARIACÃO.	DATA DE COLETA				
	06/89	08/89	12/89	04/90	05/91
Profundidade de 0-5 cm					
Preparo (A)	*	*	ns	ns	ns
Calagem (b)	ns	ns	ns	ns	ns
Tráfego (c)	*	*	*	*	*
A*B	ns	ns	ns	ns	ns
A*C	ns	ns	ns	ns	ns
B*C	ns	ns	ns	ns	ns
A*B*C	ns	ns	ns	ns	ns
Profundidade de 5-10 cm					
Preparo (A)	*	*	ns	ns	ns
Calagem (b)	ns	ns	ns	ns	ns
Tráfego (C)	ns	*	*	*	*
A*B	ns	ns	ns	ns	ns
A*C	ns	ns	ns	ns	ns
B*C	ns	ns	ns	ns	ns
A*B*C	ns	ns	ns	ns	ns
Profundidade de 10-20 cm					
Preparo (A)	*	*	*	*	*
Calagem (B)	ns	ns	ns	ns	ns
Tráfego (C)	ns	*	*	*	*
A*B	ns	ns	ns	ns	*
A*C	ns	ns	ns	ns	*
B*C	ns	ns	ns	*	ns
A*B*C	ns	ns	ns	*	*
Profundidade de 20-35 cm					
Preparo (A)	*	*	ns	ns	ns
Calagem (B)	ns	ns	ns	ns	ns
Tráfego (C)	ns	ns	*	ns	ns
A*B	ns	ns	ns	ns	ns
A*C	ns	ns	ns	ns	ns
B*C	ns	ns	ns	ns	ns
A*B*C	ns	ns	ns	ns	ns
Profundidade de 35-60 cm					
Preparo (A)	*	*	*	*	*
Calagem (B)	ns	ns	ns	ns	ns
Tráfego (C)	ns	ns	*	ns	ns
A*B	ns	ns	ns	ns	ns
A*C	ns	ns	ns	ns	ns
B*C	ns	ns	ns	ns	ns
A*B*C	ns	ns	ns	ns	ns

Obs. * e ns indicam efeito significativo e não significativo ao nível de 5%, respectivamente.

QUADRO 1.5..Resultados da análise de variância do IC em função da data de amostragem.

Fator de variação	Significância (p=0.05)
Profundidade de 0-5 cm	
Preparo (P).....	*
Tráfego (T).....	*
Data de coleta (D).....	*
PxT.....	ns
PxD.....	*
TxD.....	*
Profundidade de 5-10 cm	
Preparo (P).....	*
Tráfego (T).....	*
Data de coleta (D).....	*
PxT.....	ns
PxD.....	ns
TxD.....	*
Profundidade de 10-20 cm	
Preparo (P).....	*
Tráfego (T).....	*
Data de coleta (D).....	*
PxT.....	ns
PxD.....	ns
TxD.....	*
Profundidade de 20-35 cm	
Preparo (P).....	*
Tráfego (T).....	*
Data de coleta (D).....	*
PxT.....	ns
PxD.....	ns
TxD.....	ns
Profundidade de 35-60 cm	
Preparo (P).....	*
Tráfego (T).....	*
Data de coleta (D).....	*
PxT.....	ns
PxD.....	*
TxD.....	ns

Obs. * e ns indicam efeito significtivo e não significativo ao nível de 5%, respectivamente.

ANEXO II

Quadro II.1. Resumo dos resultados da análise de variância da densidade do solo, por profundidade e data de amostragem.

Quadro II.2. Resumo dos resultados da análise de variância do conteúdo de água disponível, por profundidade e data de amostragem.

Quadro II.3. Resumo dos resultados da análise de variância para a porosidade do solo, por profundidade e data de amostragem.

Quadro II.4. Resumo dos resultados da análise de variância da comparação entre as datas de amostragens para a densidade, porosidade e conteúdo de água disponível.

Quadro II.5. Produtividade das culturas de milho (híbrido P 3230) e soja (variedade Iguaçu), média de três repetições (kg/ha).

Quadro II.6. Resumo da análise de variância da produtividade das culturas de milho e soja.

Figura II.1. Curva de retenção de água no solo para os tratamentos de preparo com arado de discos (A) e alvecas (B), com tráfego e sem calcário.

QUADRO 11.1. Resumo dos tratamentos significativos ao nível de 5% para a densidade do solo, determinados pela análise de variância, para as amostragens realizadas em 04/90 e 05/91.

Profundidade	amostragem 04/90	amostragem 05/90
0-5cm	tráfego	tráfego
5-10cm	tráfego	tráfego
10-20cm	tráfego	tráfego
20-35cm	tráfego	-----
35-60cm	preparo	-----

QUADRO 11.2. Resumo dos tratamentos significativos ao nível de 5% para o conteúdo de água disponível, determinados pela análise de variância, para as amostragens realizadas em 04/90 e 05/91.

Profundidade	amostragem 04/90	amostragem 05/90
0-5cm	tráfego	tráfego
5-10cm	tráfego	tráfego
10-20cm	preparo	tráfego
20-35cm	-----	-----
35-60cm	-----	tráfego

QUADRO 11.3. Resumo da análise de variância da porosidade do solo, determinada em 04/90 e 05/91, por profundidade de amostragem.

Prof. 0-5cm	04/90	05/91
Poros totais	tráfego	tráfego
Poros. de aeração	tráfego	tráfego
Microporos	tráfego	tráfego
Prof. 5-10cm		
Poros totais	tráfego	tráfego
Poros. de aeração	tráfego	tráfego
Microporos	tráfego	-----
Prof. 10-20cm		
Poros totais	tráfego	tráfego
Poros. de aeração	tráfego	-----
Microporos	preparo e tráfego	-----
Prof. 20-35cm		
Poros totais	tráfego	-----
Poros. de aeração	tráfego	-----
Microporos	-----	-----
Prof. 35-60cm		
Poros totais	preparo	preparo e tráfego
Poros. de aeração	tráfego	-----
Microporos	tráfego	-----
Obs. Os tratamentos são significativos ao nível de 5%.		

QUADRO 11.4. Resumo dos análise de variância da efeitos da época de amostragem sobre a densidade, porosidade e água disponível do solo.

Prof. 0-5cm	04/90	05/91
Poros totais	ns	
Poros. de aeração	ns	
Microporos	ns	
Densidade do solo	Interação coleta x tráfego	
Água disponível	ns	
Prof. 5-10cm		
Poros totais	ns	
Poros. de aeração	ns	
Microporos	ns	
Densidade do solo	ns	
Água disponível	ns	
Prof. 10-20cm		
Poros totais	ns	
Poros. de aeração	ns	
Microporos	ns	
Densidade do solo	ns	
Água disponível	Interação coleta x tráfego	
Prof. 20-35cm		
Poros totais	ns	
Poros. de aeração	ns	
Microporos	ns	
Densidade do solo	ns	
Água disponível	Interação coleta x tráfego	
Prof. 35-60cm		
Poros totais	ns	
Poros. de aeração	ns	
Microporos	ns	
Densidade do solo	ns	
Água disponível	Interação preparo x coleta x tráfego	

Obs. Os tratamentos são significativos ao nível de 5%.

Quadro 11.5. Produtividade das culturas de milho (híbrido P 3230) e soja (variedade Iguaçu), média de três repetições (kg/ha).

milho		
Discos a 20cm	Alvecas a 35cm	Rotativo a 60cm
10381(381)1	9853(1047)	9355(1153)
soja		
	com tráfego	sem tráfego
Discos a 20cm	3235(750)	4180(165)
Alvec. a 35cm	4042(288)	4027(242)
Rotat. a 60cm	3832(852)	3898(408)
1 desvio padrão		

Quadro 11.6. Resumo da análise de variância da produtividade das culturas de milho e soja.

Tratamentos	culturas	
	milho	soja
Preparo	ns	ns
Calagem	ns	ns
Tráfego	-	*
Prep. x Calag.	ns	ns
Prep. x Tráf.	-	*
Tráf. x Calag.	-	ns
Prep. x Calag. x Tráf.	-	ns

Obs. * e ns indicam efeito significativo e não significativo dos tratamentos a nível de 5% de probabilidade.

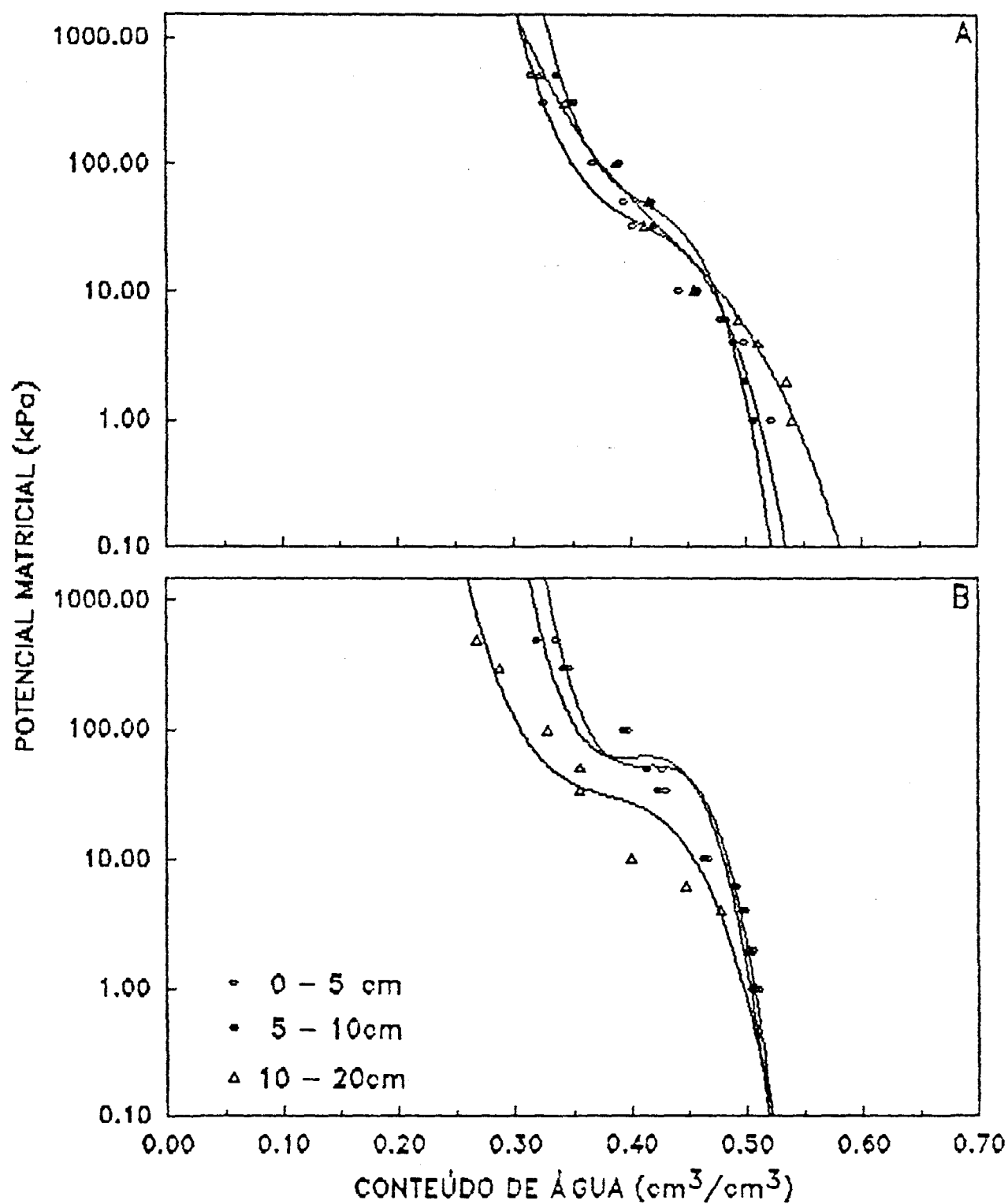


Fig.11.1. Curvas de retenção de água no solo, tratamento de preparo com arado de discos (A) e alvecas (B), com tráfego e ausência de calcário, amostragem 05/91.

LITERATURA CITADA.

1. ALL-DURRAH, M.M., BRADFORD, J.M. New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.45, p.949-953, 1981.
2. ALLMARAS, R.R. et al. Long term cultivation effect on hydraulic properties of Walla-Walla silt loam. Soil Tillage Res., Amsterdam, v.2, p.265-279, 1982.
3. ANGER, D., KAY, B.D., GROENEVELT, P.H. Compaction characteristics of a soil cropped to corn and brome grass. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.51, p.779-783, 1987.
4. ASADY, G.H., SMUCKER, A.J.M. Compaction and root modification of soil aeration. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.52, p.251-254, 1989.
5. AUBERTIN, G.M., KARDOS, L.T. Root growth through porous media under controlled conditions. I. Effect of pore size and rigidity. Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison, v.29, p.290-293, 1966.
6. AYLMORE, L.A.G., QUIRK, J.P. The micropore size distribution of clay mineral systems. Journal of Soil Science, London, v.18, n.1, p.1-17, 1972.

7. BARLEY, K.P. Mechanical resistance of the soil in relation to the growth of root and emerging shoots. *Agrochimica*, v.20, p.173-182, 1976.
8. BARLEY, K.P. The effects of mechanical stress on the growth of roots. *Journal of Experimental Botany*, v.13, p.95-110, 1962.
9. BARLEY, K.P. Influence of soil strength on growth of roots. *Soil Science*, London, v.96, p.175-180, 1963.
10. BARNES, K.K., ELLIS, E.F. Effect of different methods of cultivation and direct drilling and disposal of straw residues on population earthworms. *J. Soil Sci.*, London, v.30, p.669-679, 1979.
11. BARLEY, K.P., GREACEN, E.L. Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of roots and underground shoots. *Advances in Agronomy*, New York, v.19, p.1-43, 1967.
12. BARLEY, K.P., FARREL, D.A., GREACEN, E.L. The influence of the soil strength on the penetration of a loamy soil by plant roots. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, v.3, p.69-77, 1965.

13. BAUDER, J.W., RANDALL, G.W., SWAN, J.B. Effect of four continuous tillage system on mechanical impedance of a clay loam soil. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.45, p.802-806, 1981.
14. BAVER, L.D., GARDNER, W.H., GARDNER, W.R. Soil Physics. New York, John Wiley & Sons, 498p, 1972.
15. BENGHOUGH, A.G., MULLINS, C.E. Mechanical impedance to growth root: a review of experimental techniques and root growth responses. Journal of Soil Science, London, v.41, p.341-358, 1990a.
16. BENGHOUGH, A.G., MULLINS, C.E. The resistance experienced by root growing in a pressurized cell - a reappraisal. Plant and Soil, Dordrecht, v.123, p.73-82, 1990b.
17. BEVEN, K., GERMAN, P. Water flow in soil macropores. I. An experimental approach. Journal of Soil Science, London, v.32, p.15-29, 1981.
18. BEVEN, K.P., GERMAN, P. Macropores and water flow in soils. Water Resource Research, v.18, p.1311-1325, 1981.

19. BLACKWELL, P.S. et al. Compaction of a silt loam soil by agricultural vehicles. I. Effects upon soil conditions. Soil Tillage Research, Amsterdam, v.7, p.97-116, 1986.
20. BLACKWELL, P.S. et al. Compaction of a swelling clay soil by agricultural traffics: effects upon conditions for growth of winters cereals and evidence for some recovery of structure. Journal of Soil Science, London, v.36, p.633-650, 1985.
21. BLACKWELL, P.S. et al. Evaluation of soil compaction by transverse wheeling of tillage slots. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.53, n.1, p.11-15, 1989.
22. BLACKWELL, P.S. et al. Response of biopores channels from root to compaction by vertical stress. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.54, p.1088-1091, 1990.
23. BLAKE, G.R., HARTGE, K.H. Bulk density. In: A. Klute (ed). Methods of soil analysis, physical, chemical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1982, p.363-375.
24. BLAKE, G.R., NELSON, W.W., ALLMARAS, R.R. Persistence of subsoil compaction in a mollisol. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.40, p.943-948, 1976.

25. BOONE, F.R. Wheater and other enviroment factors influencing in crop response to tillage and traffic. Soil Tillage Res., Amsterdam, v.11, p.283-324, 1988.
26. BOONE, F.R. et al. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. 2. Soil conditions and plant growth. Netherlands Journal of Agricultural Science, 35:113-128, 1986.
27. BOUMA, J. Soil survey and the study of water on unsaturated soil. Survey Paper.13, Soil Survey Institute, Wagenigen, 1977.
28. BOUMA, J., BELMAN, C.F.M., DEKKER, L.W. Water infiltration and redistribution in a silt loam subsoil with vertical worm channels. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.46, p.1917-1921, 1982.
29. BOWEN, H.D. Alleviating mechanical impedance. In. Modifying the Root Enviroment to Reduce Crop Stress. American Society of Agriculturals Engineers. St. Joseph,, p.21-57, 1981.
30. BRADFORD, J.M. Penetrability. In: A. Klute (ed). Methods of Soil Anallsys, Physical, Chemical and Mineralogical Methods. America Society of Agronomy, Madison, 1986.

31. BRADFORD, J.M. The penetration resistance in a soil with wheel-defined structural units. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.44, p.601-606, 1980.
32. BRADFORD, J.M., FARREL, D.A., LARSON, W.E. Effect of soil overburden pressure on penetration of fine metal probes. Soil Sci. Soc. Am. Proc., v.35, p.12-15, 1971.
33. BUSSCHER, W.J., KARLEN, D.L., SOJKA, R.E., BURNHAM, K.P. Soil and plant response to the subsoiling implements. Soil Sci. Soc. Am. J., v.52, p.804-809, 1988.
34. BYRD, C.W., CASSEL, D.K. The effect of sand content upon cone index and selected physical properties. Soil Science, Baltimore, v.129, p.97-204, 1980.
35. CAMPBELL, D.J. et al. Controlled seedbed traffic after ploughing or direct drilling under winter barley in Scotland 1980 -1994. Soil Tillage Research, Amsterdam, v.8, p.3-28, 1986.
36. CAMPBELL, R.B., REICOSKI, D.C., DOTI, E.W. Physical properties and tillage paleoduits in the southeastern coastal plains. J. Soil Water Conservation, Ankeny, v.29, p.220-226, 1974.

- 37.CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies of fine sandy loam. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, v.70, p.425-433, 1990.
- 38.CARTER, M.R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. Soil Tillage Res., Amsterdam, v.12, p.37-51, 1988.
- 39.CARY, J.W., HAYDEN, C.W. Soil strength and porosities associated with cropping sequenced. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.38, p.840-843, 1974.
- 40.CASSEL, D.K. Effects of plowing depth incorporation of lime and phosphorus upon physical and chemical properties two coastal plain after 15 years. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.42, p.116-120, 1980.
- 41.CASSEL, D.K. Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of Norfolk loamy sand. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.47, p.196-205, 1983.

- 42.CASSEL, D.K. Tillage effects on soil bulk density and mechanical impedance. In:Predicting tillage effects on soil physical properties and processes, Madison, 1982. Proceedings...,Madison: America Society of Agronomy, 1982. p.145-167.
- 43.CASSEL, D.K., BAVER, A. Spatial variability in soils below depth of tillage. Bulk density and 15 atmosphere moisture percentage. Soil Sci. Soc. Am. Proc.,Madison, v.39, p.247-250, 1975.
- 44.CASSEL, D.K., BOWEN, H.D., NELSON, L.A. An evaluation of mechanical impedance for three tillage treatments on Norfolk sandy loam. Soil ,Sci.Soc.Am.J., Madison, v.42, p.116-120, 1978.
- 45.CASSEL, D.K., NELSON, L.A. Spatial and temporal variability of soil physical properties of norfolk loamy sand as affected by tillage. Soil Tillage Research, Amsterdam, v.5, n.1, p.5-17, 1979a.
- 46.CASSEL,D.K., NELSON,L.A. Variability of mechanical impedance in a tilled one-hectare field Norfolk Sandy Loam. Soil Sci. Soc. Am.J., Madison, v.43, p.450-455, 1979b.

47. CHILDS, E.C. The use of soil moisture characteristics in soil studies. Soil Sci., Baltimore, v.50, p.239-252, 1940.
48. CINTRA, F.L.D., MIELNICZUCK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos degradados. Rev. bras. Ci. Solo. Campinas, v.7, p.323-327, 1983.
49. CLOTHIER, B.C., WHITE, I. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.45, p.241-261, 1981.
50. COCKROFT, B., BARLEY, K.P., GREAGEN, E.L. The penetration of clays by fine probes and root tip. Australian Journal of Soil Research, Melbourne, v.7, p.333-348, 1969.
51. CRUSE, R.M., CASSEL, D.K., AVERRETE, F.G.. Effect of particle surface roughness on densification of coarse textured soils. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.44, p.692-697, 1980.
52. CULLEY, J.L.B., LARSON, W.E. Susceptibility to compression of a clay loam haplaquol. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.51, p.562-567, 1987.

- 53.CULLEY, J.L.B., LARSON, W.E., RANDALL, G.W. Physical properties of a typic Haplaquoll under tillage and no-tillage. Soil sci. Soc. Am. J.,Madison, v.51, p.1587-1593, 1987.
- 54.CURRIE, J.A. Gas diffusion through soil crumbs the effects of compaction and wetting. Journal Of Soil Science, London, v.35, p.1-10, 1984.
- 55.DANIELSON,R.E., SUTHERLAND,P.L. Porosity. In:A.Klute (ed). Methods of soil analysis, physical and mineralogical methods. Madison: America Society of Agronomy, 1982,p.443-461.
- 56.DENMEAD,O.T., SHAW,R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. Agron. J., Madison, v.54, p.385-390, 1962.
- 57.DERPSCH,R., SIDIRAS, N., ROTH, C.H. Results of studies made from 1977-1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Parana, Brasil. Soil Tillage Res., Amsterdam, v.8, p.253-263, 1986.
- 58.DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. Soil Tillage Resarch, Amsterdam, v.11, p.199-238, 1988.

59.DEXTER, A.R. Mechanic of root growth. Plant and Soil, Dordrecht, v.98, p.303-312, 1986.

60.DEXTER, A.R., RADKE, J.K. , HEWITT, J.S. Structure of a tilled soil as influenced by tillage, wheat cropping, and rainfall. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.47, p.570-575, 1983.

61.DEXTER, A.R. Two types of soil anisotropy by the passage of wetting front. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.47, p.1060 -1061, 1983.

62.DEXTER, A.R., TANNER, D.C. Time dependence of compressibility for remoulded and undisturbed soil. J. Soil Sci., Madison, v.25, p.153-164, 1974.

63.DOMZAL, A., SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A. Effect of tillage and wheater condition a structure and physical properties of soil and yeld of winter wheath. Soil Tillage Research, Amsterdam, v.10, p.225-241, 1987.

64.DOUGLAS, J.T., GOSS, M.J., HILL, D. Measurements of pore characteristics in a clay soil under ploughing and direct drilling including use of a radioactive (^{144}Ce) technique. Soil Tillage Res., Amsterdam, v.1, p.11-18, 1980.

- 65.EAVIS,B.W. Soil physical conditions affecting seedling root growth. I.Mechanical impedance, aeration e moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a Sandy Loam soil. Plant and Soil, The Hague, v.36, p.613-622,1972.
- 66.EDWARDS, W.M., van der PLOEG, R.R.,EHLERS, W. A numerical study of the effects of non capillary sized pores upon infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.3, p.851-856, 1979.
- 67.EHLERS, W. Observation on earthworms channels and infiltration on tilled and untilled loes soil. Soil Sci., Baltimore, v.119, p.242-248, 1975.
- 68.EHLERS,W., KOPKE,W.,HESSE,F.,BOHM,W. Penetration resistance and root growth of oats in a tilled and untilled loess soil. Soil Tillage Res.,v.3, p.261-275, 1983.
- 69.EMBRAPA.Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. MANUAL DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE SOLOS. Rio de Janeiro, SNLCS, 1979. não paginado.
- 70.ERICKSON,A.E. Tillage effects on soil aeration. In:Predicting tillage effects on soil physical properties and processes, Madison, 1982. Proceedings...,Madison: America Society of Agronomy, 1982. p.91-104.

- 71.FAHAD et al. Soil physical properties as affected by soybeans and other cropped sequences. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.46, p.377-381, 1982.
- 72.FARREL, D.A., GREACEN, E.L. Resistance to penetration of fine probes in compressive soils. Australian Journal Soil Research, Melbourne, v.4, p.1-17, 1966.
- 73.FERNANDES, B. et al. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (TYPIC ARGIAQUOLL e TYPIC HAPLUDALF). R. bras. Ci. Solo., Campinas, v.7, p.329-33, 1987.
- 74.FERNANDES, B., GALLOWAY, H.M. Efeito das rodas do trator e propriedades físicas do solo. Ceres, Viçosa, v.3, n.196, p.562-568, 1988.
- 75.FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRONOMICO DO PARANÁ. Plantio direto no Estado do Paraná. Londrina, 241p, 1981.(circular, 1apar,23)
- 76.GAMEDA,S. Subsoil compaction in a clay soil. 1.Cumulative effects. Soil Tillage Res., Wageningen, v.10, p.113-122, 1987.

77. GANTZER, C.J., BLAKE, G.R. Physical characteristics of Le Sueur clay loam soil following no-till and conventional tillage. *Agronomy Journal*, Madison, v.70, p.853-857, 1978.
78. GARCIA, F., CRUSE, R.M., BLACKMER, A.M. Compaction and nitrogen placement effect on root growth water depletion and nitrogen uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.52, p.792-798, 1988.
79. GARDNER, W.R. Dynamic aspects of availability water to plants. *Soil Sci.*, Baltimore, v.89, p.63-73, 1960.
80. GERARD, C.J., SEXTON, P., SHAW, G. Physical factors influencing soil strength and root growth. *Agronomy Journal*, Madison, v.74, p.875-879, 1982.
81. GERARD, C.J., MEHTA, H.C., HINOJOSA, F. Root growth in a clay soil. *Soil Science*, Baltimore, v.114, p.37-49, 1972.
82. GILL, W.R. Influence of compaction hardening of soil on penetration resistance. *Transaction of ASAE*, St. Joseph, v.11, p.741-753, 1968.

83. GLASBEY, C.A., O'SULLIVAN, M.F. Analysis of cone resistance data with missing observations below stones. *Journal of Soil Science, London*, v.39, p.587-592, 1988.
84. GODOY, H., CORREA, A.R., SANTOS, D. *Clima do Paraná. Manual Agropecuário para o Paraná. Fundação Instituto Agrônômico do Paraná. Londrina*, 1976.
85. GOSS, M.J. Effects of mechanical impedance and root growth in barley (*Hordeum vulgare*, L). Effects on elongation and branching of seminal roots. *Journal of Experimental Botany*, v.28, p.96-111, 1977.
86. GOSS, M.J., RUSSEL, R.S. Effect of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare*, L). III. Observations on the mechanism of response. *Journal of Experimental Botany*, v.31, p.577-588, 1980.
87. GRABLE, A.R., SIEMER, E.F. Effect of bulk density, aggregate size and water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v.32, p.180-186, 1968

88.GRAECEN,E.L.,OH,J.S. Physics of root growth. Nature(New Biology), v.235, p.24-25, 1972.

89.GRAHAM, J.P. et al.Compaction of a silt loam by wheeled agricultural vehicles. II. Effects on growth and yield of direct drilled winter wheat. Soil Tillage Research, Amsterdam, v.7, p.189-203, 1986.

90.GROENEVELT, P.H., KAY, B.D., GRANT,C .D. Physical assesment of a soil with respect to rooting potential.Geoderma,Amsterdam, v.34, p.101-114, 1984.

91.GUPTA, S.C., ALLMARAS, R.R. Models to asses the susceptibility of soil to excessive compaction. Adv. Soil Science, New York, v.6, p.65-100, 1988

92.GUPTA,S.C., LARSON,W.E. Modeling soil mechanical behavior during tillage. In: Symposium on predicting tillage effects on soil physical properties and processes, 1982, Madison. Proccedings, Madison: American Society of Agronomy, 1982. p.151-178.

93.GUPTA,S.C., SHARMA, P.P., De FRANCHI,S.A. Compaction effects on soil structure. Advances in Agronomy, New York, v.42, p.331-338, 1988.

94. GUPTA, S.C. et al. Development of guides for estimating the ease of compaction of world soils. Res. Rep. Submitted to Binational Agricultural Research Development Fund. on Completion of a Research Grant n. US-337-80. Bet Dagan, Israel, 1985, 130p.
95. HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. Advances in Agronomy, New York, v.38, p.95-152, 1985.
96. HAMBLIN, A.P. Soil water behaviour in response to changes in soil structure, Journal of Soil Science, v.33, p.375-385, 1982.
97. HAMBLIN, A.P., TENNANT, D. The influence of tillage on soil water behaviour. Soil Sci., Baltimore, v.112, p.233-239, 1981.
98. HAMLIN, A.P., DAVIES, D.B. Influence of organic matter on the physical properties of some East Anglian Soils of high silt content. Journal of Soil Science, London, v.28, p.11-22, 1977.
99. HANKANSSON, I., VOORHEES, W.D., RILEY, A. Vehicle and wheel factors influence soil compaction and crop responses in different traffic regimes. Soil Tillage Research, Amsterdam, v.11, p.239-282, 1988.

- 100.HARGROVE,W.L., HARDCASTLE,W.S. Conservation tillage practices for winter wheat production in the Appalachian Piedmont. J. Soil Water Conserv.,Ankeny, v.39, p.324-326,1984.
- 101.HENDERSON,C.W.L. Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform sandy soils. Aust. J. Agric. Res., Melbourne, v.40, p.497-508,1989.
- 102.HILL, R.H. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.54, p.161-166,1990.
- 103.HILLEL, D. Fundamentals of Soil Physics. New York, Academic Press, 1980a, 13p.
- 104.HILLEL, D. Application of Soil Physics. New York, Academic Press, 1980b.
- 105.HUCK,M.G. Variation to taproot elongation rate as influenced by composition of soil air. Agron. J., Madison, v.62, p.815-818,1970.

- 106.KAYOMBO, B., LAL, R. Effects of soil compaction by rolling on soil structure and development of maize in no-till and disc ploughing systems on a Tropical Alfisol. Soil Tillage Research, Amsterdam, v.7, p.117-134, 1986.
- 107.KEMPER,W.D. e ROSENAU,R.C. Soil cohesion as affected by time and water content. Soil Sci. Soc. Am.J.,Madison, v.48, p.1001-1006,1984.
- 108.KIEHL,E.J. Porosidade. In:Manual de Edafologia:Relações solo-planta. Ed. Ceres, São Paulo,p.96-111, 1979.
- 109.KIRKHAM,D., POWERS,W.L. Advanced Soil Physics. Wiley-Interscience, New York, 1972.
- 110.KLUTE,A. Water Retention:Laboratory Methods. In. A.Klute (ed). Methods of soil analisys, physical chemical and mineralogical methods.Madison:America Society of Agronomy, p.635-886, 1986.
- 111.KNEALE, W.R. Observation of the behaviour of large cores of soil during drainage, and calculation of hidraulic conductivity. Journal of Soil Science, v.48, p.879-884, 1984.

112.LAL, R., LOGAN, T.J., FAUSEY, N.R. Long term tillage and wheel traffic effects on a poorly drained Mollic Ocharaqualf in Northwest Ohio.1. Soil physical properties, root distribution and grain yield of corn and soybean. Soil Tillage Res., Amsterdam, v.14, p.341-35, 1989.

113.LAL,R. Physical characteristics of soil of the tropics:Determination and management. In:Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics. Chichester, John Wiley & Sons., 1979,p.7-44.

114.LAL,R. No tillage effects on soil properties and maize (Zea mays) production in the Western Nigeria. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.40, p.762-768, 1976.

115.LARSON,W.E., OSBORNE,G.J. Tillage accomplishment and potentials.In:Predicting tillage effect on soil physical properties and processes. American Society of Agronomy, Madison, 1982, p.

116.LARSON,W.E.; GUPTA,S.C. e USECHE,R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. Soil Sci. Soc. Am.J.,Madison, v.44, p.450-457,1980.

- 117.LEE, K.E. Earthworms: Their ecology and relationships with soil and land use. New York, Academic Press, p.410, 1985.
- 118.LINCH, J.M., BRAGG, E. Microorganism and soil aggregate stability. In. Advances in Soil Science, New York, v.2, p.133-171, 1985.
- 119.LOW, A.J. Soil structure and crop yield. Journal of Soil Science, London, v.24, n.2, p.249-259, 1973.
- 120.LOWRY, F.E., TAYLOR, H.M., HUCK, M.G. Growth rate and yield of cotton as influenced by depth and bulk density of soil pans. Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison, v.34, p.306-309, 1970.
- 121.MACHADO, J.A & BRUM, A.C.R. Efeito de sistemas de cultivos em algumas propriedades físicas do solo. R. bras. Ci. Solo, Campinas, v.2, p.81-84, 1976
- 122.MARSHALL, T.J., HOLMES, J.W. Soil Physics. Cambridge University Press, 1977, p.345.
- 123.McINTYRE, D.S., TANNER, C. Abnormally distributed soil physical measurements and nonparametric statistics. Soil Science, Baltimore, v.88, p.133-137, 1959.

124. MEEK, B.D. et al. Soil compaction and its effects on alfalfa in zone production systems. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.52, p.232-236, 1985.
125. MIELKE, L.N., DORAN, J.W., RICHARDS, K.A. Physical environment near the surface of plowed and no-tilled soils. Soil Tillage Res., Amsterdam, v.7, p.355-366, 1986.
126. MIRREH, H.F., KETCHESON, J.W. Influence of soil matric potential and resistance to penetration on corn root elongation. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, v.53, p.383-388, 1973.
127. MISRA, R.K., DEXTER, A.R., ALLSTON, A.M. Maximum axial and radial growth pressure of plant roots. Plant and Soil, Dordrecht, v.98, p.315-326, 1986.
128. MISRA, R.K.; DEXTER, A.R. e ALLSTON, A.M. Root growth and phosphorus uptake in relation to the size and strength of soil aggregates. II. Prediction by a stochastic model. Soil Tillage Res., Amsterdam, v.11, p.117-132, 1988.

129. NEARING, M.A., e WEST, L.T. Soil strength indices as indicator of consolidation. Transactions of ASAE, St. Joseph, v.31, n.2, p.471-4476, 1988.

130. NEARING, M.A.; WEST, L.T. e BRADFORD, J.M. Consolidation of an unsaturated illitic clay soil. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.52, p.929-934, 1988.

131. NEGI, S.C., RAGHAVAN, G.S.V., TAYLOR, F. Hydraulic characteristics of conventionally and zero tillage field plots. Soil Tillage Res., v.2, p.281-292, 1982.

132. NESMIT, D.S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on a Ultissol. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.51, p.183-186, 1987.

133. NEWMAN, A.C.D., THOMASSON, A.J. Rothamsted studies of soil structure. III. Pore size distribution and shrinkage processes. Journal Soil Sci., London, v.30, p.415-439, 1978.

134. OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. Plant Soil, Dordrecht, v.76, p.319-337, 1984.

135.OHU,J.O., FOLORUNSO,O.A. The effect of machinery traffic on the physical properties of a sandy loam soil and on the yield sorghum in North Eastern Nigeria. Soil Tillage Res.,Amsterdam, v.13, p.399-405,1989.

136.OJENIYI, S.O., DEXTER,A.R. Soil factors affecting the macrostruture produced by tillage. Trans. of ASAE,----p.339-343, 1979.

137.ONI, K.C., ADEOTI, J.S. Tillage effects on differently compacted soils and on cotton yield in Nigeria. Soil Tillage Res., Amsterdam, v.8, p.89-100, 1986.

138.ONOFIUK, O.E. Spatial and temporal variability of some soils physical properties following tillage of a Nigerian Paleustult. Soil Tillage Research, Amsterdam, v.12, p.285-298,1988.

139.PEARSON,R.W. Soil enviromet and root development. In:Plant enviroment and efficient water use. Soil Science Society of America, Madison, p.95-126,1981.

140.PERUMPRAL, J.V. Cone penetrometer application - a review. Transaction of ASAE, St. Joseh, v.30, n.4, p.939-944,1987.

141. PHILIPS, R.E., KIRKHAN, A. Mechanical Impedance and corn seedling root growth . Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison, v.26, p.319-322, 1962.
142. PIDGEON, J.D., SOANE, B.D. Soil structure e strength relations following tillage, zero tillage and wheel traffic in Scotland. In. Modification of soil structure. John Wile & Sons., 1979.
143. PIKUL Jr., J.L., ALLMARAS, R.R. Physical and chemical properties of a Haplaxeroll after fifty years of residue management. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.50, p.214-219, 1986.
144. POWERS, D.H., SKIDMORE, E.L. Soil structure as influenced by simulated tillage. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.48, p.879-884, 1984.
145. RADCLIFFE, D.E. et al. Effect of tillage properties on infiltration and soil strength of a Typic Hapludult soil after ten years. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.52, p.798-804, 1988.
146. RADCLIFFE, D.C. et al. Effect of traffic did in row chiseling on impedance mechanical. Soil Sci. Soc. Am. Journal, Madison, v.53, n.4, p.1197-1201, 1989.

- 147.REEVE, M.J., SMITH, P.D., THOMASSON, A.J. The effect of density on water retention properties of field soils. Journal of Soil Sci., London. v.24, n.3, p.355-367, 1973.
- 148.REID, J., GOSS, M.J. Effect of living roots of different plant species on the aggregate stability of two arable soils. Journal of Soil Science, London, v.32, p.521-541, 1981.
- 149.RICHARDS,B.G., GRACEN,E.L. Mechanical stress on a expanding cilindrical root analogue media. Aust.J.Agric. Res.,Melbourne, v.24, p.393-404, 1986.
- 150.SHAFER, R.L., JOHNSON, C.E. Changing soil condition- The dynamic of Tillage. In:Predicting Tillage effects on soil physical properties and processes, 1982, Madison. Proceedings. Madison: America Society of Agronomy, 1982. P.151-178.
- 151.SELIM, H.M.et al. Variability of in situ measured mechanical Impedance for a fragipan soil. Soil Science, Baltimore, v.144, n.6, p.442-452, 1987.

152. SHANMUGANATHAM, R.T., OADES, J.M. Effect of dispersible clay on the physical properties of the Horizon B of a Red Brown Earth. Aust. Journal Soil Res., v.20, p.315-324, 1982.
153. SHIPITALO, M.J., PROTZ, R. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. Canadian J. Soil Sci., Ottawa, v.67, p.445-456, 1987.
154. SIDIRAS, N., VIEIRA, M.J. Comportamento de um Latossolo Roxo distrófico compactado pelas rodas do trator na semeadura e rendimento das culturas. Pesq. Agrop. Bras., Brasília, v.19, p.1285-1293, 1984.
155. SOANE, B.D., PIDGEON, J.P. Tillage requirements in relative to soil physical properties. Soil Sci., Baltimore, v.119, p.376-384, 1975.
156. STITT, R.E. et al. Mechanical Impedance of tillage pans in Atlantic Coastal plains soils and relationships with soil physical, chemical and mineralogical properties. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.46, p.100-106, 1982.

157. STOLZY, L.H., BARLEY, K.P. Mechanical resistance encountered by root entering compacted soils. Soil Science, Baltimore, v.105, p.297-301, 1965.
158. SWANSSON, G.L.W., PETERSON, J.B. The use of micrometrics and other methods for the evaluation of soil structure. Journal of Soil Sci., London, v.924, p.173-185, 1947.
159. TAYLOR, H.M. e RATLIFF, L.F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. Soil Science, Baltimore, v.108, p.113-119, 1969a.
160. TAYLOR, H.M., RATLIFF, L.F. Root growth pressures of cotton, peas and peanuts. Agronomy Journal, Madison, v.61, p.398-402, 1969b.
161. TAYLOR, H.M., BURNETT, E. Influence of soil strength on the root growth habitat of plants. Soil Science, Baltimore, v.98, n.1, p.174-180, 1964.
162. TAYLOR, H.M., GARDNER, H.R. Penetration of cotton seedlings taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. Soil Science, Baltimore, v.96, n.3, p.153-156, 1963.

163. TAYLOR, H.M., ROBERSON, G. M., PARKER, J.J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soils materials. Soil Sci., Baltimore, v.102, p.18-22, 1966.
164. TAYLOR, H.M. Root behaviour as affected by structure and strength. In: E.W. CARSON (ed). The plant root and its environment. Univ. of Virginia Press, Charlottesville, p.270-291, 1974.
165. THOMASSON, A.J. Toward an objective classification of soil structure. Journal of Soil Science, London, v.29, p.38-46, 1978.
166. THOMPSON, P.J., JANSEN, I.J., HOOKS, L.L. Penetrometer and bulk density as parameter for predicting root systems performance in mine soils. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.51, p.1288-1293, 1987.
167. TISDALL, J.M., OADES, J.M. Organic matter and water stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, London, v.2, p.141-163, 1982.
168. TOLLNER, E.W., VERMA, B.P. Modified cone penetrometer for measuring soil mechanical impedance. Transactions of ASAE, St. Joseph, v.27, p.331-336, 1984.

169. UNGER, P. Effects of deep tillage and profile modification on soil properties, root growth, and crop yields in the United States and Canada. *Geoderma*, Amsterdam, v.22, p.275-295, 1979.
170. UNGER, P.W., ECK, H.V., MUSICK, J.T. Alleviating plant water stress. In. *Modifying the Root Environment to Reduce Water Stress*. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, p.21-57, 1981.
171. UTOMO, W.H., DEXTER, A.R. Effect of ageing on compression resistance and water stability of soil aggregates disturbed by tillage. *Soil Tillage Res.* Amsterdam, v.1, p.127-137, 1981.
172. VAZQUEZ, D.L. et al. Soil compaction associated with tillage treatment for soybean. *Soil Tillage Research*, Amsterdam, v.13, p.35-42, 1989.
173. VEEN, B.W. The influence of mechanical impedance on the growth of maize roots. *Plant and Soil*, The Hague, v.66, p.101-109, 1982.
174. VEEN, B.W., BOONE, F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. *Soil Tillage Research*, Amsterdam, v.16, p.219-226, 1990.

- 175.VEPRASKAS, M.J. Cone Index of a loamy sand as influenced by pore size distribution and effective stress. Soil Sci. Soc. Am.J.,Madison, v.48, n.6, p.1220-1225, 1984.
- 176.VEPRASKAS, M.J., MINNER, G.S. Effect of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root growth. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.50, p.423-427,1986.
- 177.VEPRASKAS, M.J.,MINNER, G.S., PEEDIN, G.F. Relationship of dense tillage pans, soil properties and subsoiling to tobacco root growth. Soil Sci. Soc. Am. J.,Madison, v.50, p.1541-1546,1986.
- 178.VOMOCIL, J.A., FLOCKER, W.J. Effects of soil compaction on storage and movement oof soil, air and water. Trans. of ASAE, St. Joseph, v.4, p.242-246, 1961.
- 179.VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviation wheel induced soil compaction. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.42,p.129-133,1983.

180.VOORHEES, W.B., EVANS, B.S.D., WARNES, D.D. Effect of pre-plant wheel traffic on soil compaction, water use in growth of spring wheat. Soil Sci. Soc.Am. J.,Madison, v.49, p.215-220,1985.

181.VOORHEES, W.B., FARREL, D.A., LARSON, W.E. Soil strength and aeration effects of root elongation.Soil Sci. Soc. Am.Proc., Madison, v.39, p.948-953, 1975.

182.VOORHEES, W.B., LINDSTROM, M.J. Soil compaction constraints on conservation tillage in the northern corn belt. Journal of Soil Water Conservation, Ankeny, v.38, n.3, p.307-311, 1983.

183.VOORHEES, W.B., SENST, C.G., NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the northern Corn Belt. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.42, p.344-349, 1978.

184.VOORHEES,W.B. Soil tilth deterioration under row cropping in the Northern Corn Belt: Influence of Tillage and wheel traffic. J. Soil Water Cons., Ankeny, v.34, p.p.184-186, 1979.

- 185.VOORHEES,W.B., LINDSTROM,M.J. Soil compaction constraints on conservation tillage in the Northern Corn Belt. Journal of Soil and Water Conserv., Ankeny, v.38, p.307-311, 1983.
- 186.VOORHESS,W.B., LINDSTROM,M.J. Long term effects of tillage methodson soil tilth independent of wheel traffic compaction. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison,v.48,p.152-156, 1984.
- 187.WHITELEY,G.M., UTOMO,W.H., DEXTER,A.R. 1981. Comparison of penetrometer pressure and pressure exerted by roots. Plant and Soil, The Hague, v.61, p.351-354, 1981.
- 188.WILKINSON,L. Systat: The System for Statistics.Evanston, Systat Inc., 1987.não paginado.
- 189.ZACHMANN, J.E., LINDEN, D.R., CLAPP,C.E. Macropores infiltration and redistribution as affected by earthworms, tillage, and residue. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v.51, p.1580-1586, 1987.
- 190.ZAI, R., KACHANOSKI, R.G., VOROMY, R. P. Tillage effects on the spatial and temporal variability of soil water. Soil Sci.Soc. Am.J., Madison, v.54, p.186-192, 1990.